

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

ББК 31.37

П 38

УДК 621.311.22 : 681.5 (075.32)

Рецензент Всесоюзный заочный энергетический техникум

Плетнев Г. П.

П 38 Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок электростанций: Учебник для техникумов. — 3-е изд., перераб. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 344 с.: ил.

Приведены краткие сведения по теории автоматического управления. Описаны технические средства автоматизации, применяемые на электростанциях. Рассмотрены системы автоматического регулирования, устройства логического управления и защиты теплоэнергетических установок, а также автоматизированные системы управления технологическим процессом тепловой электростанции в целом. Второе издание вышло в 1976 г. под названием «Автоматическое регулирование и защита теплоэнергетических установок тепловых электростанций». Третье издание существенно переработано в связи с изменением учебных программ.

Для учащихся энергетических и энергостроительных техникумов.

П 2303030000-069
051(01)-86 219-86

ББК 31.37

УЧЕБНИК

ГЕННАДИЙ ПАНТЕЛЕЙМОНОВИЧ ПЛЕТНЕВ

Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок электростанций

Редактор В. С. Мухин

Редактор издательства Т. И. Мушинская

Художественные редакторы В. А. Гозак-Хозак, Г. И. Панфилова

Технический редактор О. Д. Кузнецова

Корректор Г. А. Полонская

ИБ № 754

Сдано в набор 15.11.85 Подписано в печать 20.03.86. Т-08642
Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 1 Гарнитура литературная
Печать высокая Усл. печ. л. 18,06. Усл. кр.-отт. 18,06 Уч.-изд. л. 20,11
Тираж 9600 экз. Заказ 919. Цена 90 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

© Издательство «Энергия», 1976
© Энергоатомиздат, 1986, с изменениями

ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие автоматизации тепловых электростанций за истекшее десятилетие после второго издания связано в основном с внедрением новых технических средств и усилением роли АСУ ТП в управлении крупными энергоблоками. Поэтому в третьем издании книги в первой ее части при рассмотрении основ теории управления сделаны изменения, связанные лишь с сокращением устаревшего материала, изменением учебной программы и приведением упрощенной методики расчета настроек двухконтурных автоматических систем. Вторая часть, в которой рассматриваются автоматические регуляторы тепловых процессов, во многом написана заново. Существенные изменения и добавления внесены в третью часть, связанную с описанием автоматических систем регулирования, дистанционного и логического управления, защит и современных АСУ ТП ТЭС.

Автор очень признателен коллективу цикловой учебно-методической комиссии Всесоюзного заочного энергетического техникума и отдельным читателям за пожелания и замечания, сделанные по второму и настоящему изданиям. Большую работу по редактированию и подготовке рукописи выполнил канд. техн. наук В. С. Мухин, за что ему автор очень благодарен.

Все замечания и пожелания по третьему изданию книги просим высылать по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Автор

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

I. Обозначения теории автоматического управления

x — входной сигнал звена, объекта, системы
 y — выходной сигнал звена, объекта, системы
 u — задающий сигнал
 y^* — сигнал ошибки (рассогласования)
 x_p — регулируемый сигнал
 T — постоянная времени звена, объекта, системы;
 период колебаний сигнала
 K, k — коэффициент усиления, пропорциональности
 $p = d/dt$ — оператор дифференцирования
 $1/p = \int dt$ — оператор интегрирования
 $L\{y(t)\} = p \int_0^\infty y(t) e^{-pt} dt$ — оператор преобразования сигнала
 Лапласа — Карсона
 $W(p)$ — передаточная функция (оператор) звена, объекта, системы
 $M(\omega)$ — амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)
 $W(i\omega)$ — комплексная частотная характеристика (КЧХ)
 $p_i = \alpha_i \pm i\beta_i$ — корень характеристического уравнения звена, системы
 M — показатель колебательности
 m — степень колебательности
 ψ — степень затухания
 $\varphi(\omega)$ — фазочастотная характеристика (ФЧХ)
 τ — время запаздывания, с (мин)
 ω — частота колебаний сигнала, s^{-1} (рад/с)
 δ — степень обратной связи

II. Обозначения в электрических схемах

ТУ — тиристорный усилитель
 Л, НЛ — сигнальная лампа, неоновая лампа
 У — обмотка управления двигателя
 В — выключатель, обмотка возбуждения двигателя
 ПУ — переключатель управления
 КУ — ключ управления
 КВМ, КВБ — концевой выключатель «меньше», «больше»
 ПВМ, ПВБ — путевой выключатель «меньше», «больше»
 Z — электрическая нагрузка (комплексная)
 ω — обмотка, число витков в катушке

III. Обозначения в схемах регулирования и защиты

РП — регулируемый прибор
 ЗРУ — задатчик ручного управления
 Д — дифференциатор
 ДП — динамический преобразователь
 ИМ — исполнительный механизм
 ЖОС — жесткая обратная связь
 РО — регулируемый орган
 $p_{п.п}$ — давление перегретого пара
 p_m — давление перегретого пара в общей магистрали
 Температура (t, θ):
 $t_{п.п}$ — перегретого пара (первичного)
 $t_{в.п}$ — перегретого пара (вторичного)
 $t_{пр}$ — в промежуточной точке тракта
 $t_{с.в}$ — сетевой воды
 Расход (G, D, Q):
 $D_{п.п}$ — перегретого пара
 $D_{в.п}$ — вторичного пара
 $D_{г.п}$ — греющего пара
 D_t — пара на турбину
 D_b — из барабана
 $D_{п.в}$ — питательной воды
 D_k — конденсата
 $D_{пр}$ — продувочной воды
 $D_{впр}$ — воды на впрыск
 $D_{с.в}$ — сетевой воды
 H — уровень
 v — вакуум
 Q_g — расход газа
 B_t — расход топлива
 Q_v — расход воздуха

ВВЕДЕНИЕ

Энергетическая программа СССР на длительную перспективу предусматривает «повышение производительности труда при производстве энергетических ресурсов на основе внедрения новейших достижений науки и техники». Основная доля выработки электроэнергии в современном энергобалансе страны приходится на тепловые электрические станции (ТЭС).

На ТЭС осуществляется непрерывное и вместе с тем поэтапное преобразование теплоты, скрытой в топливе, в электричество: паровой котел вырабатывает перегретый водяной пар, в турбине его потенциальная энергия переходит в кинетическую, которая в электрическом генераторе преобразуется в энергию переменного тока частотой 50 Гц.

Процессы преобразования и распределения тепловой и электрической энергии на современных ТЭС почти полностью механизированы и в значительной степени автоматизированы.

Механизацией в промышленном производстве обычно называют применение машин и специальных устройств или приспособлений, заменяющих физический труд человека. На ТЭС в этих целях используются передвижные подъемные краны и экскаваторы (разгрузка и перегрузка твердого топлива), механические и гидравлические транспортеры сыпучих материалов (угля и золы), электроприводы запорных и регулирующих органов (клапанов, задвижек), электроприводы вспомогательных механизмов (тягодутьевых машин, насосов, углеразмольных мельниц и др.). Человек в механизированном производстве призван непрерывно управлять машинами, механизмами и установками (включать или отключать их в требуемом порядке) и наблюдать за их действием.

Под управлением в технических системах понимается функция (работа, исполнение командных сигналов), обеспе-

чивающая поддержание заданных режимов эксплуатации технологического оборудования и достижение поставленных целей.

Автоматизацией механизированного производства называют применение технических средств (от простейших измерительных приборов и регуляторов до современных электронных вычислительных машин) и систем управления, освобождающих человека частично или полностью от непосредственного участия в процессах выработки, преобразования и передачи энергии (материалов, информации).

Примером простейшего автоматического регулятора служит первый регулятор промышленного назначения — регулятор уровня воды в барабане парового котла, разработанный и внедренный известным русским теплотехником И. И. Ползуновым еще в XVIII веке (1765 г.). Этот регулятор действует следующим образом (рис. В.1).

При появлении небаланса между притоком воды в котел $D_{п.в}$ и уходящим из него паром $D_{п.к}$ уровень воды в барабане (регулируемая величина) H_0 начнет отклоняться от своего первоначального среднего значения (например, повышаться). Тогда поплавок (чувствительный элемент) 1, поднимаясь вдоль направляющей, начнет закрывать заслонку 2 (регулирующий орган) и тем самым уменьшать приток питательной воды в барабан. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока уровень не достигнет нового более высокого установившегося значения. В данном случае реализуется способ регулирования по отклонению, получивший название «принципа Ползунова — Уатта». Сущность его состоит в следующем: чем больше отклонение регулируемой величины, тем больше перемещение регулирующего органа в направлении, препятствующем этому отклонению. Уравнение движения регуляторов Ползунова — Уатта (закон регулирования) можно записать следующим образом:

$$x_p(t) = K_p y(t),$$

где $x_p(t)$ — перемещение регулирующего органа; $y(t)$ — отклонение регулируемой величины; K_p — коэффициент усиления регулятора.

В настоящее время наряду с регуляторами этого типа более широко применяются автоматические регуляторы непрямого действия, в которых регулирующий орган перемещается от внешнего источника энергии (электрического, гидравлического или пневматического). Регу-

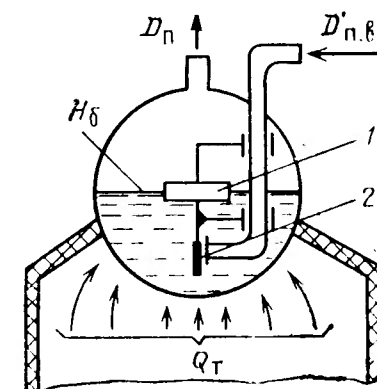


Рис. В.1. Регулятор уровня воды в барабане парового котла

лирование по отклонению является основным принципом действия большинства современных автоматических регуляторов.

Из приведенных примеров и сказанного выше становятся ясными понятия *регулирования* как разновидности управления и *регулятора* как технического устройства:

автоматическое регулирование — автоматическое поддержание вблизи постоянного значения некоторой физической величины, характеризующей управляемый процесс;

автоматический регулятор — устройство, которое вырабатывает регулирующее воздействие в соответствии с требуемым законом регулирования.

Научно-технический прогресс в современном промышленном производстве в значительной мере связан с автоматизацией.

К настоящему времени автоматизация производства выделилась в самостоятельную отрасль науки и техники, в которой разрабатываются вопросы теории автоматического управления и автоматические системы регулирования производственных процессов, создаются и внедряются необходимые технические средства.

В автоматизированном производстве человек призван лишь периодически воздействовать на главные машины, механизмы и установки, определяющие нормальный ход технологического процесса, и наблюдать за наиболее важными его параметрами по показаниям приборов. Автоматизация тепловой части электрических станций предусматривает:

дистанционное управление, или управление машинами и механизмами на расстоянии;

теплотехнический контроль (измерение) текущих значений параметров технологического процесса;

технологическую сигнализацию о состоянии основного и вспомогательного оборудования;

автоматическую защиту основного и вспомогательного оборудования от возможных повреждений в процессе эксплуатации;

автоматическое непрерывное регулирование, обеспечивающее автоматическое поддержание технологических параметров вблизи заданного значения;

логическое управление, обеспечивающее автоматическое включение или отключение регуляторов, машин, механизмов и установок в заданной последовательности.

Перечисленные функции выполняются одноименными подсистемами управления. Человек-оператор и подчиненные ему подсистемы должны управлять процессами выработки

заданного количества теплоты и электрической энергии, поддерживать значения основных технологических параметров, чтобы обеспечить минимум расхода топлива. Учитывая, что на экономичность установок оказывает влияние большое количество взаимодействующих факторов, для ее оценки можно использовать электронную цифровую вычислительную машину (ЭЦВМ), обеспечивающую автоматический сбор необходимой информации и расчет ТЭП.

Подсистемы контроля, управления и расчета ТЭП вместе с ЭЦВМ, подчиненной оператору, образуют *автоматизированную систему управления технологическими процессами* (АСУ ТП) тепловой электростанции.

Применение автоматизированных систем управления позволяет повысить надежность и экономичность энергетических установок при малом числе обслуживающего персонала, способствует повышению его квалификации. При этом ЭЦВМ может быть передана значительная часть функций по контролю и управлению.

Энергетическая программа СССР предусматривает модернизацию существующего оборудования ТЭС и совершенствование их систем управления в широких масштабах. В связи с этим для полного вытеснения ручного труда эксплуатационного персонала предстоит выполнить целый ряд мероприятий организационного и научно-технического характера в масштабе электростанций и энергосистем. В частности, довести до конца механизацию и автоматизацию разгрузки, складирования и транспортирования твердого топлива в пределах ТЭС, удаления и транспортировки шлака, очистки поверхности нагрева и обмывки паровых котлов, работающих на твердом топливе, и др.

Создание автоматизированных систем управления, соответствующих уровню развития энергетики ближайшего будущего (до 2000 г.), как на действующих, так на вновь строящихся электростанциях связано с дальнейшим развитием отраслей промышленности, выпускающих новые технические средства автоматики и вычислительной техники, а также с экономическими возможностями социалистических предприятий. В настоящее время можно наметить следующие рубежи этого процесса. На первом этапе предстоит окончательно внедрить и освоить технические средства, позволяющие уверенное управление энергоблоком одним или двумя операторами во всех режимах эксплуатации. На втором — сократить оперативную загруженность персонала, связанную с выполнением однообразных действий по контролю и управлению, передав эти функции

ЭЦВМ, с тем, чтобы сосредоточить внимание на главном: выработке заданного количества электрической энергии и теплоты при выполнении установленных норм удельных расходов топлива. На третьем—наряду с выполнением задач первого и второго этапов значительно расширить кибернетические возможности комплекса технических средств, установить непрерывную связь АСУ ТП ТЭС по каналам контроля и управления с подсистемами нижнего и верхнего уровней с целью усиления взаимодействия электростанций, энергосистем и энергообъединений, решающих общую задачу повышения надежности и экономической эффективности энергоснабжения потребителей. Автоматизация ТЭС на основе АСУ ТП соответствует общему направлению и перспективам развития энергетики в СССР.

Часть первая

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ. НАЧАЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Глава первая

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ И ЕЕ ЭЛЕМЕНТЫ

1.1. ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР

Технологическим *объектом управления* называют совокупность технологического оборудования и реализованного на нем технологического процесса производства (ГОСТ 17194-74). При этом объекты управления могут быть простыми (одиночная емкость или участок трубопровода, заполненные газом или жидкостью, и др.) и сложными (паровые котлы, турбины и др.) и управляться как простыми устройствами, так и сложными системами.

Вначале рассмотрим работу простого устройства (рис. 1.1), с помощью которого можно поддерживать постоянным давление воды в трубопроводе при изменении ее расхода. Оно состоит из коробки с мембраной 1, верхняя полость которой сообщается соединительной трубкой 2 с участком трубопровода, где необходимо поддерживать постоянным давление p_t , груза 3 массой G , закрепленного на поворотном рычаге 4, и игольчатого клапана 5. Его шток 6 через уплотнение 7 выведен из корпуса клапана и посредством пальца 8 соединен с вилкой поворотного рычага 4, а верхним концом упирается в жесткий диск 10, являющийся активной частью S мембраны 1. При постоянном расходе воды через клапан $G_{пр}$ и некотором постоянном давлении p_t , которое может контролироваться манометром 12, усилие, приложенное к диску 10, уравновешивается грузом 3. При этом диск мембраны и шток клапана неподвижны. С изменением расхода воды со стороны потребителя $G_{ст}$ (допустим, при его увеличении) ее давление

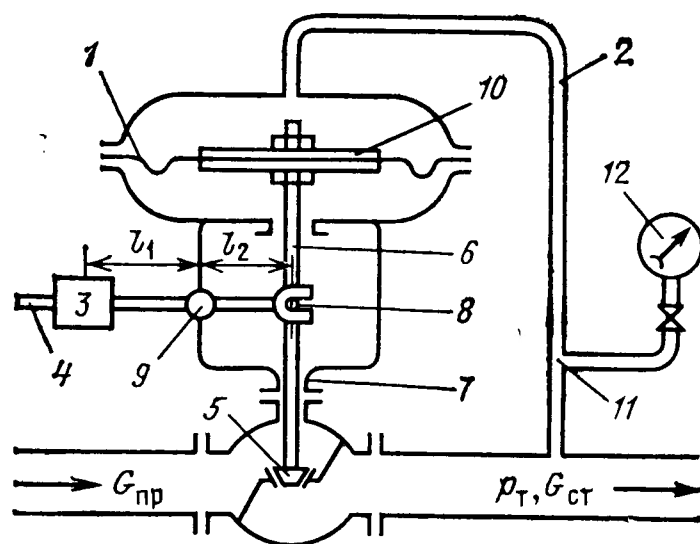


Рис. 1.1. Регулятор давления прямого действия

начнет уменьшаться, следовательно, уменьшится и усилие, развиваемое диском 10. Тогда под действием груза рычаг будет поворачиваться относительно своей опоры 9 против часовой стрелки и перемещать вверх шток, а вместе с ним и иглу 5, увеличивая при этом проходное сечение клапана. Если давление до регулирующего клапана превышает p_t , а источник водоснабжения по своим запасам значительно превосходит максимально возможный расход потребителя, то подъем штока клапана и регулирующей иглы приведет к увеличению расхода воды через клапан и восстановлению нарушенного равновесия между ее притоком и стоком. Очевидно также, что перемещение диска мембраны и подъем штока будут происходить до выравнивания моментов сил M_1 и M_2 , развиваемых грузом 3 и диском 10 мембраны относительно опоры 9: $M_1 = M_2$ или $Gl_1 = p_t Sl_2$. Это равенство наступит лишь при достижении давления воды за клапаном, равного своему первоначальному значению p_t .

Таким же образом устройство будет восстанавливать давление и при уменьшении расхода со стороны потребителя, действуя в направлении закрытия клапана.

Условимся в дальнейшем называть: участок трубопровода от клапана до точки измерения давления — *участком регулирования*; давление воды p_t — *регулируемой величиной*; клапан 5, регулирующий расход воды, — *регулирующим органом*; мембрану 1, воспринимающую давление воды, — *измерительным устройством*; активную часть мембраны или диск, развивающий усилие, необходимое для перемещения регулирующего органа, — *усилительным устройством*; груз 3, перемещаемый вдоль рычага 4 и уравнивающий усилие мембраны, — *задающим устройством*, или *задатчиком*. Измерительное и усилительное устройства вместе с задатчиком образуют *регулятор*.

В данном случае регулирующий клапан 5 перемещается под действием усилия, развиваемого измерительной мембраной 1, точнее, активной ее частью s . Это означает, что она совмещает функции измерительного и усилительного устройства. Устройство, описанное выше, называется регулятором *прямого действия*. В отличие от него регулятор *непрямого действия* для перемещения регулирующего органа использует усилие, развиваемое внешним источником энергии. Участок регулирования (в общем случае объект управления), регулятор и регулирующий орган образуют *систему регулирования*. Поскольку в рассматриваемом примере поддержание p_t происходит без участия человека, регулятор называется *автоматическим*, а система регулирования — *автоматической системой регулирования (АСР)*.

Введем общие понятия для АСР различного назначения: *входное воздействие* — воздействие, приложенное к входу АСР, в данном случае изменение расхода воды на притоке $\Delta G_{пр}$; *внешнее возмущающее воздействие*, в данном случае изменение расхода на стоке $\Delta G_{ст}$; *выходное воздействие* — воздействие, выдаваемое на выходе АСР, в данном случае изменение давления воды p_t ; *регулирующее воздействие* — воздействие регулятора на управляемый объект, в данном случае перемещение регулирующего клапана; *задающее (заранее заданное) воздействие*, в данном случае перемещение груза, уравнивающего усилие мембраны, вдоль рычага, на котором он закреплен.

Величины, характеризующие воздействия, будем именовать *сигналами*. Для вышеназванных понятий введем следующие условные обозначения, являющиеся общими для всех автоматических систем: $y = \Delta p_t / p_{0t}$ — выходной сигнал объекта, системы регулирования; $x = \Delta G_{пр} / G_{пр}$ — входной сигнал объекта, системы регулирования со стороны регулирующего органа; $x_b = \Delta G_{ст} / G_{0ст}$ — сигнал внешнего возмущающего воздействия; $x_p = \Delta h / h_0$ — сигнал на выходе регулятора или регулирующий сигнал; $u = \Delta M_1 / M_{01}$ — сигнал на выходе задатчика, или задающий сигнал.

В принятых обозначениях Δ означает приращение величин относительно их номинальных или заданных значений, обозначенных индексом «0». Таким образом, y , x , x_p и u — безразмерные величины, исчисляемые в долях единицы, что существенно упрощает математические операции над ними. В дальнейшем наряду с понятием сигнала будут использоваться также общепринятые в технической литературе понятия *выходная величина* y и *входная величина* x . Работу рассмотренного устройства отражает схема, при-

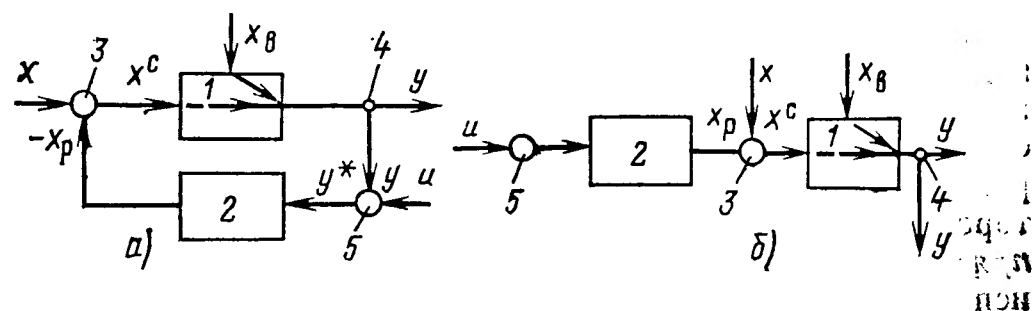


Рис. 1.2. Структурные схемы АСР:

а — замкнутой; б — разомкнутой; 1 — объект регулирования; 2 — регулятор; 3 — регулирующий орган; 4 — точка разветвления; 5 — элемент сравнения сигналов y и u

веденная на рис. 1.2. Появление небаланса между притоком и стоком или появление внешнего возмущающего воздействия x_b вызывает падение давления p_t или эквивалентного ему выходного значения y . Тогда из-за разницы в усилиях, развиваемых грузом G и давлением p_t , действующих на диск 10 (см. рис. 1.1), т. е. из-за разности сигналов $y - u = y^*$, игольчатый клапан будет перемещаться до тех пор, пока не исчезнет небаланс между притоком и стоком.

Перемещение клапана обозначается на схеме — x_p (со знаком минус). Физически это означает, что перемещение клапана происходит в направлении, противоположном первоначальному небалансу между притоком и стоком, т. е. в сторону «открыть» при $G_{пр} - G_{ст} > 0$ и в сторону «закрыть» при $G_{пр} - G_{ст} < 0$. Стрелки на схеме указывают направление потока вещества или энергии в объекте управления и воздействия регулятора на регулируемый орган.

Схема, приведенная на рис. 1.2, полностью отражает работу рассмотренного автоматического устройства, однако на ней отсутствуют изображения конкретных узлов и деталей (корпус клапана, мембрана, груз, соединительная линия и т. д.). Условные обозначения сигналов y , x , u , x_b , используемые на схеме, — безразмерные величины. Это позволяет применить математические методы для анализа действия рассмотренной АСР ко всем устройствам аналогичной структуры независимо от их конструктивного или технического исполнения. Поэтому данная схема носит название *структурной*.

Рассмотрим некоторые особенности АСР, структурная схема которой представлена на рис. 1.2, а. Выходная величина объекта регулирования p_t может изменяться под действием двух факторов: внешнего возмущающего воздействия x_b (возмущение на стоке) и регулирующего воздействия x_p (изменение расхода на притоке). При этом уве-

личение или уменьшение y вызывает перемещение регулирующего органа x_p , что приводит к восстановлению первоначального значения p_t посредством изменения регулирующего воздействия x_p . Таким образом, выход объекта управления через регулятор связан с его входом. Такого рода системы относятся к устройствам с замкнутой цепью воздействия и носят название *замкнутых* автоматических систем регулирования. Поскольку воздействие с выхода объекта на его вход осуществляется в рассматриваемом примере лишь по единственному каналу, система называется *одноконтурной*, что вполне соответствует ее изображению на рис. 1.2, а. Передача воздействия с выхода объекта или системы регулирования на вход носит название *обратной связи*. Канал, по которому передается это воздействие, называется каналом обратной связи.

подавляющее большинство промышленных АСР, в том числе применяемых на ТЭС, относится к *замкнутым* системам.

В отличие от замкнутых АСР существуют *разомкнутые* системы, которые могут быть получены при устранении одной из связей замкнутого контура. В рассматриваемом на рис. 1.1 примере можно разомкнуть систему, перекрыв соединительную трубку 2. Структурная схема разомкнутой системы представлена на рис. 1.2, б. Здесь изменение p_t под действием внешнего возмущения x_b не приведет к перемещению регулирующего органа x_p и изменению x , поскольку нарушена связь измерительного устройства регулятора с регулируемой величиной. Иными словами, отсутствует передача воздействия с выхода объекта на его вход, а система, изображенная на рис. 1.2, а, разомкнута в точке 4. Регулирование давления p_t в этом случае можно осуществить лишь ручным способом, воздействуя на поворотный рычаг с грузом.

Рассмотрим отдельные элементы, из которых составлены схемы на рис. 1.2. Элемент 1 (или 2) называется *звеном*.

В общем случае звеном называют простейший элемент системы, отличающийся единством конструкции или однородностью протекающего в нем физического (технологического) процесса. На структурных схемах звено изображается прямоугольником с указанием стрелками направления входного и выходного сигналов. В реальных системах звеном может быть объект управления, регулятор или отдельные их части, в которых происходит преобразование входной величины в выходную. Математическим описанием звена служит уравнение, связывающее входную и выход-

ную величины в установившемся состоянии, т. е. в статике $y=f(x)$, или в состоянии движения, т. е. в динамике $dy(t)/dt=f[x(t), y(t)]$.

Элементы или устройства, выполняющие функции сравнения нескольких величин, носят название *сумматоров*. В АСР сумматором может быть, например, измерительное устройство (устройство сравнения сигналов) или регулирующий орган. Математическим описанием суммирующего элемента служит операция алгебраического сложения двух или нескольких величин. В данном случае сумматор описывается следующими уравнениями:

для точки 3

$$x^c = x - x_p;$$

для точки 5

$$y^* = y - u_0.$$

Точка 4 схемы называется точкой *разветвления*. Ее функции может выполнять тройник 11, с помощью которого, как показано на рис. 1.1, происходит раздвоение трубки в направлении измерительного прибора 12 и регулятора. В тройнике не происходит разделения сигнала y по мощности, т. е. мощность сигнала до точки разветвления на схеме и после нее остается неизменной.

Используя понятия звена, сумматора, точки разветвления и вышепринятые условные обозначения, можно составить упрощенные структурные схемы любой промышленной АСР. Составление структурной схемы является первым этапом исследования АСР.

1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

АСР, действующие по отклонению регулируемой величины. Рассмотренная в § 1.1 система регулирования относится к так называемым *стабилизирующим* автоматическим системам, поскольку в ней осуществляется поддержание регулируемой величины близ постоянного значения независимо от $Q_{ст}$ или нагрузки объекта.

Большинство промышленных систем регулирования относится к стабилизирующим автоматическим системам. Работу такой системы отображают зависимости изменения значений y , u и x_b во времени, приведенные на рис. 1.3, а. Отличительной чертой таких систем служит постоянство

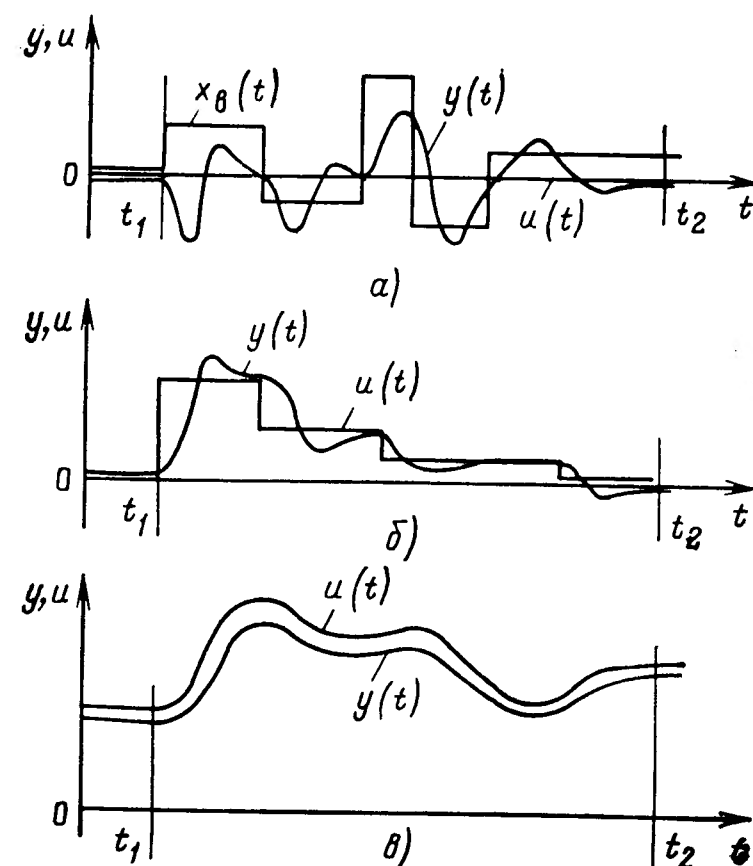


Рис. 1.3. Графики $y(t)$, $x_b(t)$, $u(t)$

заданного значения регулируемой величины u в течение длительного промежутка времени.

В других системах, например в установках для термической обработки металлоизделий, заданное значение регулируемой величины u должно изменяться с течением времени по заранее заданной программе в соответствии с требуемым режимом. Такого рода системы относятся к *программным* автоматическим системам. Графики, отображающие их действие, представлены на рис. 1.3, б [1, 2].

Существуют также системы, в которых задающее воздействие служит произвольной функцией времени (заранее не определенной). В таких системах выходная величина y должна «следить» за возможными изменениями u и воспроизводить их с требуемой точностью. Системы такого рода относятся к особому классу *слеящих* автоматических систем управления [2]. Графики $y(t)$ и $u(t)$ для слеящих систем представлены на рис. 1.3, в.

Примером автоматической слеящей системы служит система непрерывного регулирования температуры воды на выходе теплофикационных подогревателей. В автоматизированных отопительных систе-

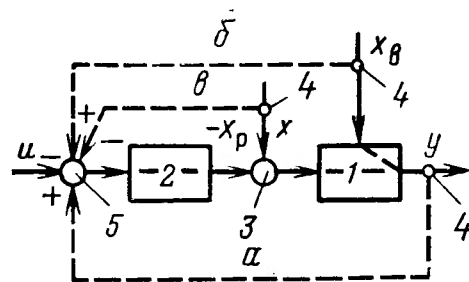


Рис. 1.4. Структурные схемы АСР.
а — АСР, действующая по отклонению;
б, в — АСР, действующая по возмущению;
а, б, в — АСР комбинированная; остальные обозначения те же, что и на рис. 1.2.

мах температура воды «следит» за изменениями сигнала, пропорционального температуре наружного воздуха, которая имеет характер произвольного процесса и служит для системы задающим воздействием.

АСР, действующие по возмущению. Рассмотренные выше системы относятся к классу автоматических систем, действующих по отклонению. Однако задача поддержания регулируемой величины вблизи заданного значения (например, давление воды на выходе системы, изображенной на рис. 1.2) может быть решена принципиально иным способом. Для этого необходимо на вход регулятора вместо сигнала по отклонению регулируемой величины от заданного значения подавать сигнал по расходу воды на сток $G_{ст}$ (рис. 1.4, линия б) или по разности расходов на притоке и стоке ($G_{ст} - G_{пр}$) (рис. 1.4, линии б и в) и воздействовать на перемещение регулирующего клапана в сторону ликвидации небаланса между притоком и стоком. Очевидно, что отклонение давления воды за регулирующим клапаном будет сколь угодно малой величиной ($y^* \rightarrow 0$) при $G_{пр} - G_{ст} \rightarrow 0$. Рассмотренный способ поддержания регулируемой величины вблизи постоянного значения называется регулированием по возмущению (по нагрузке). Автоматические системы, действующие по возмущению, включаются в работу, «не дожидаясь» отклонения регулируемой величины, а сразу же за появлением небаланса между притоком и стоком. Это существенно повышает быстродействие АСР. Однако в системах, действующих по возмущению, отсутствует непосредственный контроль отклонения регулируемой величины, что может привести к недопустимому снижению точности АСР вследствие существенных погрешностей в измерении возмущающих воздействий, например, расхода пара при изменении его параметров. Поэтому в промышленных условиях находят применение комбинированные системы, совмещающие принципы действия по отклонению (для обеспечения точности) и по возмущению (для достижения быстродействия) (рис. 1.4, линии а, б и в).

Примером промышленной комбинированной системы служит АСР питания барабанного парового котла водой, приведенная на рис. 12—21.

Многосвязные АСР. В приведенном на рис. 1.1 примере автоматического устройства объект управления имеет лишь одну регулируемую величину — давление воды за клапаном, которое можно изменять перемещением регулирующего органа. На практике встречаются более сложные задачи. То же устройство, смонтированное на паропроводе, при перемещении регулирующего органа будет изменять уже две величины — давление и температуру пара за клапаном. При этом рассмотренная ранее АСР способна решать лишь одну задачу — автоматической стабилизации давления пара. Для поддержания требуемой температуры пара необходимо предусмотреть дополнительную систему, способную регулировать температуру, например, посредством впрыска охлаждающей воды. Таким образом, для регулирования температуры и давления одновременно потребуются две взаимосвязанные АСР. Пример структурной схемы такой системы приведен на рис. 1.5. В отличие от одноконтурной, изображенной на рис. 1.2, рассматриваемая АСР состоит из трех контуров и носит название *многосвязной* АСР. Первый контур а служит для стабилизации давления редуцированного пара, контур б — для стабилизации температуры и контур в — для увеличения быстродействия АСР при отклонениях температуры, вызываемых изменениями расхода пара через редуцирующий клапан.

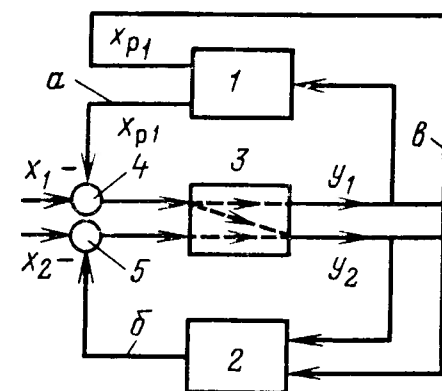


Рис. 1.5. Многосвязная АСР:

1 — регулятор давления редуцированного пара; 2 — регулятор температуры; 3 — объект регулирования — коллектор редуцированного пара; 4 — паровой редуцирующий клапан; 5 — клапан впрыска охлаждающей воды; $x_1 = \Delta D_{р.п} / D_{р.п}^0$ — расход пара; $x_2 = \Delta D_{о.в} / D_{о.в}^0$ — расход охлаждающей воды; $y_1 = \Delta p_{р.п} / p_{р.п}^0$ — давление редуцированного пара; $y_2 = \Delta t_{р.п} / t_{р.п}^0$ — температура редуцированного пара

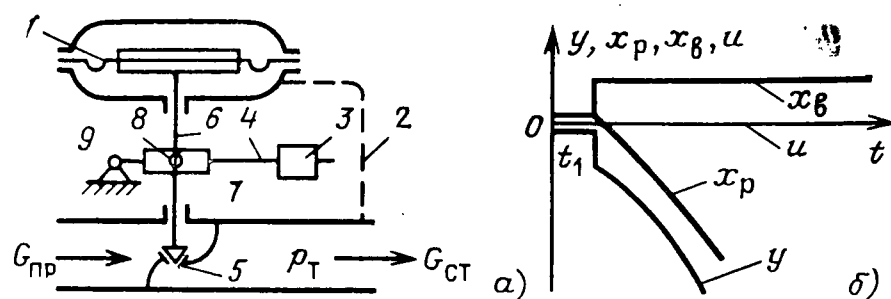


Рис. 1.7. Система с положительной обратной связью (а) и график переходного процесса в неустойчивой системе (б); остальные обозначения те же, что и на рис. 1.1.

воздействия x_p . Регулируемая величина y в результате этого воздействия будет изменяться до своего нового заданного значения. График такого процесса приведен на рис. 1.6, б.

В обоих рассмотренных случаях наблюдается переход во времени из одного установившегося состояния системы в другое, соответствующее новому значению x_b (нагрузки) или u (задания). Такой процесс носит название *переходного*. Переходный процесс в замкнутой системе называется *процессом автоматического регулирования*.

Выше рассматривались примеры переходных процессов в АСР, которые после снятия возмущающего воздействия оканчивались новым установившимся состоянием системы. Такие процессы называются *устойчивыми*. Однако возможны случаи, когда после приложения и снятия возмущающего воздействия новое состояние равновесия в АСР не наступает. Это можно наблюдать при неправильном включении в работу автоматического устройства, рассмотренного на рис. 1.1. Например, если импульсную трубку 2 подсоединить к нижней полости мембраны, соответственно изменив направление действия груза 3 (рис. 1.7, а), то при увеличении $G_{ст}$ и падении давления p_T мембрана, шток и регулирующая игла клапана под действием груза G устремятся вниз в сторону уменьшения притока, что приведет к дальнейшему падению давления p_T и в конечном итоге к полному закрытию регулирующего клапана 5. Аналогичная картина будет наблюдаться и при изменениях задания регулятору u . График процесса регулирования в этом случае приведен на рис. 1.7, б. Переходный процесс такого вида называется *неустойчивым* (расходящимся). Структурная схема данной системы останется такой же, как на рис. 1.2, изменится лишь знак регулирующего воздействия x_p . Следовательно, передача воздействия с выхода объекта на его

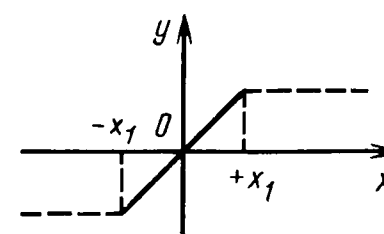


Рис. 1.8. Характеристика звена с насыщением

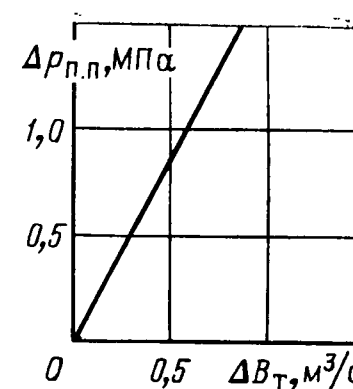


Рис. 1.9. Линейный участок экспериментальной статической характеристики парового котла $\Delta p_{п.п} = f(\Delta B_T)$ при $D_{п.п} = \text{const}$

вход будет направлена в сторону увеличения первоначального небаланса между притоком и стоком. Положительная направленность x_p превращает АСР в систему с *положительной* обратной связью в отличие от системы с *отрицательной* обратной связью, рассмотренной выше и приведенной на рис. 1.1 и 1.2, а.

Для проектирования и расчета устойчивых АСР необходимо располагать характеристиками отдельных звеньев, составляющих систему.

1.4. СПОСОБЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ЗВЕНЬЕВ И СИСТЕМ

Статические и динамические характеристики. Зависимость $y = f(x)$ звена или системы в установившемся состоянии называется *статической* характеристикой. Для линейного звена она имеет вид $y = kx$. В действительности большинство реальных систем обладает линейной характеристикой с «насыщением» (рис. 1.8). Но при малых возмущениях воздействия x_b (до 10—15 % максимально возможных) и малых отклонениях y звенья и системы, обладающие такими характеристиками, считаются линейными в области изменений x от $-x_1$ до $+x_1$. Примером экспериментальной линейной статической характеристики объекта управления служит график зависимости отклонения давления пара $\Delta p_{п.п}$ на выходе парового котла при постоянстве его паровой нагрузки от прироста расхода топлива ΔB_T (рис. 1.9).

Примером нелинейного звена служит электромеханическое реле со статической характеристикой (рис. 1.10), вы-

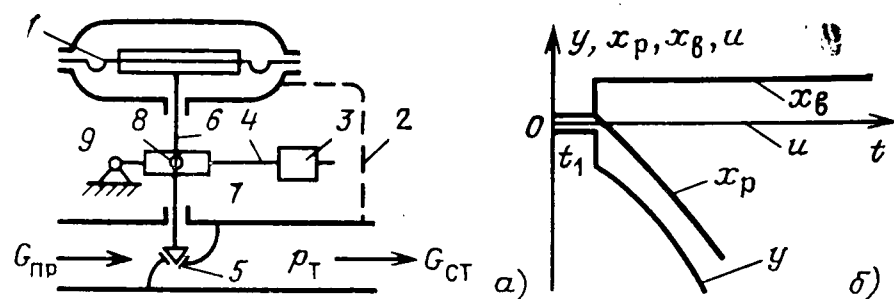


Рис. 1.7. Система с положительной обратной связью (а) и график переходного процесса в неустойчивой системе (б); остальные обозначения те же, что и на рис. 1.1.

воздействия x_p . Регулируемая величина y в результате этого воздействия будет изменяться до своего нового заданного значения. График такого процесса приведен на рис. 1.6, б.

В обоих рассмотренных случаях наблюдается переход во времени из одного установившегося состояния системы в другое, соответствующее новому значению x_b (нагрузки) или u (задания). Такой процесс носит название *переходного*. Переходный процесс в замкнутой системе называется *процессом автоматического регулирования*.

Выше рассматривались примеры переходных процессов в АСР, которые после снятия возмущающего воздействия оканчивались новым установившимся состоянием системы. Такие процессы называются *устойчивыми*. Однако возможны случаи, когда после приложения и снятия возмущающего воздействия новое состояние равновесия в АСР не наступает. Это можно наблюдать при неправильном включении в работу автоматического устройства, рассмотренного на рис. 1.1. Например, если импульсную трубку 2 подсоединить к нижней полости мембраны, соответственно изменив направление действия груза 3 (рис. 1.7, а), то при увеличении $G_{ст}$ и падении давления p_T мембрана, шток и регулирующая игла клапана под действием груза G устремятся вниз в сторону уменьшения притока, что приведет к дальнейшему падению давления p_T и в конечном итоге к полному закрытию регулирующего клапана 5. Аналогичная картина будет наблюдаться и при изменениях задания регулятору u . График процесса регулирования в этом случае приведен на рис. 1.7, б. Переходный процесс такого вида называется *неустойчивым* (расходящимся). Структурная схема данной системы останется такой же, как на рис. 1.2, изменится лишь знак регулирующего воздействия x_p . Следовательно, передача воздействия с выхода объекта на его

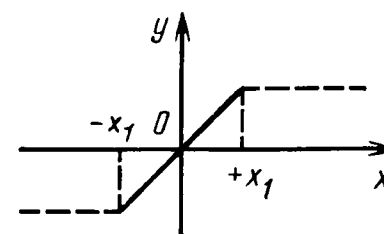


Рис. 1.8. Характеристика звена с насыщением

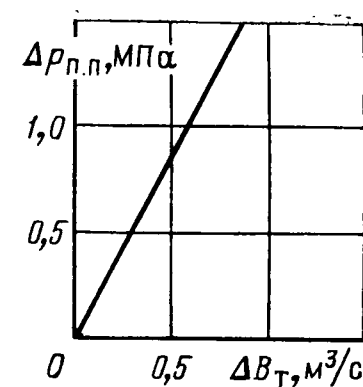


Рис. 1.9. Линейный участок экспериментальной статической характеристики парового котла $\Delta p_{п.п} = f(\Delta B_T)$ при $D_{п.п} = \text{const}$

вход будет направлена в сторону увеличения первоначального небаланса между притоком и стоком. Положительная направленность x_p превращает АСР в систему с *положительной* обратной связью в отличие от системы с *отрицательной* обратной связью, рассмотренной выше и приведенной на рис. 1.1 и 1.2, а.

Для проектирования и расчета устойчивых АСР необходимо располагать характеристиками отдельных звеньев, составляющих систему.

1.4. СПОСОБЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ЗВЕНЬЕВ И СИСТЕМ

Статические и динамические характеристики. Зависимость $y = f(x)$ звена или системы в установившемся состоянии называется *статической* характеристикой. Для линейного звена она имеет вид $y = kx$. В действительности большинство реальных систем обладает линейной характеристикой с «насыщением» (рис. 1.8). Но при малых возмущениях воздействия x_b (до 10—15 % максимально возможных) и малых отклонениях y звенья и системы, обладающие такими характеристиками, считаются линейными в области изменений x от $-x_1$ до $+x_1$. Примером экспериментальной линейной статической характеристики объекта управления служит график зависимости отклонения давления пара $\Delta p_{п.п}$ на выходе парового котла при постоянстве его паровой нагрузки от прироста расхода топлива ΔB_T (рис. 1.9).

Примером нелинейного звена служит электромеханическое реле со статической характеристикой (рис. 1.10), вы-

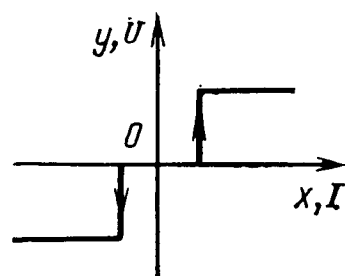


Рис. 1.10. Характеристика нелинейного звена

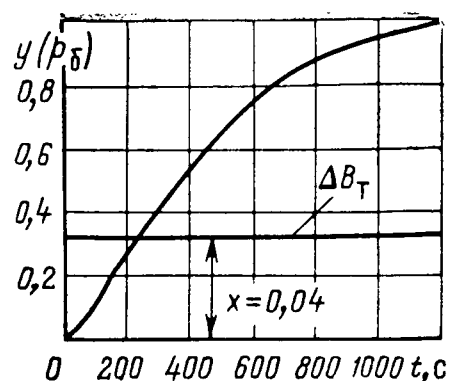


Рис. 1.11. Динамическая характеристика давления пара в барабане парового котла $p_b = f(t)$ при $x = \Delta B_T / B_T^0 = 0,04$ ($D_{п.л} = \text{const}$)

ходной величиной которого служит напряжение U , снимаемое с его контактов, а входной — ток I в индукционной катушке.

Математическая зависимость, описывающая изменение выходного сигнала звена в функции времени в переходном режиме, возникающем при изменении входного сигнала, называется *динамической* характеристикой звена.

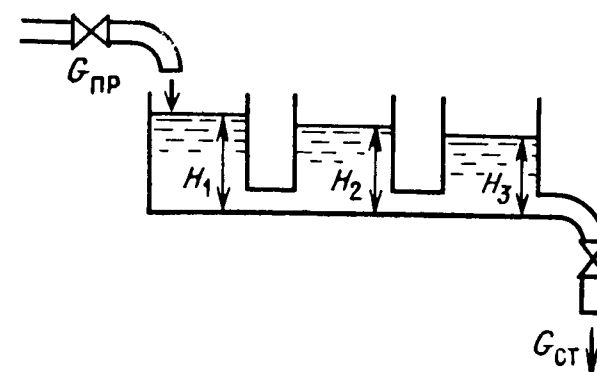
Динамическую характеристику того же парового котла можно представить, например, в виде кривой изменения давления пара в барабане $p_b(y)$ при однократном ступенчатом изменении подачи топлива $\Delta B_T(x)$ (рис. 1.11). Приближенный анализ промышленных АСР чаще всего производится в предположении, что они состоят из линейных звеньев.

Для линейных динамических звеньев (систем) справедлив принцип *суперпозиции* (наложения), смысл которого состоит в следующем: если на звено (систему) действуют два и более входных сигнала, то результирующий выходной сигнал звена равен алгебраической сумме выходных сигналов в отдельности. Этот принцип справедлив для многих реальных систем. Например, в системе, рассмотренной на рис. 1.2, результирующий сигнал по давлению воды в трубопроводе p_T также будет равен сумме реакций от возмущающего x_b и регулирующего x_p воздействий.

Динамическим звеном (системой) *направленного* (детектирующего) действия называют звено (систему), в котором энергия, вещество, продукция или информация могут распространяться лишь в одном направлении.

Примером направленных звеньев промышленных систем могут служить паровые котлы и турбогенераторы тепловых

Рис. 1.12. Гидравлическая система из трех звеньев ненаправленного действия



электрических станций. У паровых котлов входом служит расход топлива, выходом — давление и расход пара. Очевидно, что при отключенной АСР изменением расхода пара или его давления нельзя изменить расход топлива, так же как изменением потребления электрической мощности нельзя повлиять на положение паровпускных клапанов.

Линейным звеном (системой) *ненаправленного* действия называют звено, в котором энергия, вещество или информация могут передаваться как со входа на выход звена (системы), так и в обратном направлении — с выхода звена на его вход.

Примером ненаправленных звеньев могут служить баки гидравлической системы, состоящей из двух или более емкостей (рис. 1.12). В этой системе уровень воды во второй H_2 или в третьей H_3 по ходу потока емкости (звене) оказывает влияние на значение собственного входа (соответственно на H_1 и H_2).

Существуют следующие формы математического описания динамических свойств линейных звеньев и систем: дифференциальные уравнения; передаточные функции; временные характеристики; частотные характеристики.

Как будет показано ниже, каждая из указанных форм для одного и того же звена с помощью математических операций может быть преобразована в другую.

Дифференциальные уравнения. Математическая связь между выходной и входной величинами и их производными по времени для большинства тепловых объектов и промышленных регуляторов составляется на основе общих законов физики (термодинамики, гидравлики, электротехники) и приближенно может быть описана с помощью линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами [3].

Постоянные коэффициенты дифференциальных уравнений, например, для тепловых объектов вычисляются по

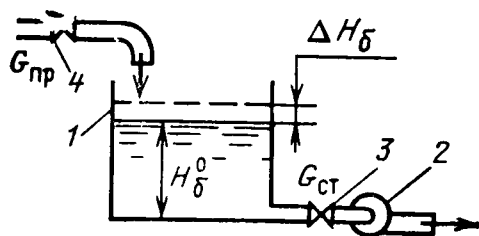


Рис. 1.13. Объект регулирования уровня воды в баке:
1 — бак с водой; 2 — откачивающий насос; 3 и 4 — краны стока и притока

даным теплового расчета агрегата, его конструктивным характеристикам или же определяются экспериментальным путем на действующих установках.

Напомним, что линейное дифференциальное уравнение 1-го порядка имеет вид:

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t), \quad (1.1)$$

или в упрощенной записи

$$a_1 y'(t) + a_0 y(t) = b_0 x(t).$$

В качестве примера составим дифференциальное уравнение для системы, изображенной на рис. 1.13. Запишем для нее уравнение материального баланса в приращениях переменных величин

$$\Delta V = S \Delta H_6, \quad (1.2)$$

где ΔV — прирост объема воды в баке за счет дополнительного открытия крана 4; S — площадь бака; ΔH_6 — прирост уровня воды в баке. За время Δt

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = S \frac{\Delta H_6}{\Delta t}. \quad (1.3)$$

Обычно мерой расхода G служит $\Delta V/\Delta t$ (единиц объема/единиц времени). Тогда (1.3) запишется следующим образом:

$$\Delta G_{\text{пр}} \frac{1}{S} = \frac{\Delta H_6}{\Delta t}. \quad (1.4)$$

Перейдя к относительным величинам, получим

$$\frac{\Delta G_{\text{пр}} G_{0.\text{пр}}}{G_{0.\text{пр}} H_{06} S} = \frac{\Delta H_6}{H_{06} \Delta t}. \quad (1.5)$$

Используя обозначения, введенные в (1.1), получаем:

$$k_{\text{н}} x = \frac{\Delta y(t)}{\Delta t}, \quad (1.6)$$

где $k_{\text{н}} = G_{0.\text{пр}}/H_{06}S$ — постоянный коэффициент,

При $\Delta t \rightarrow 0$ получим дифференциальное уравнение объекта по уровню воды

$$\frac{dy(t)}{dt} = k_{\text{н}} x(t). \quad (1.7)$$

Физически это означает, что скорость изменения уровня воды в баке прямо пропорциональна приросту расхода воды на притоке и обратно пропорциональна площади поперечного сечения бака. Решение (1.7) при ступенчатом изменении $x(x=1)$ имеет вид $y=k_{\text{н}}t$.

Передаточные функции. Дифференциальное уравнение (1.1) можно записать в следующем виде:

$$a_1 p y(t) + a_0 y(t) = b_0 x(t), \quad (1.8)$$

где $p = d/dt$ — символ дифференцирования.

Умножение переменной $y(t)$ на p будет означать ее дифференцирование, а деление — операцию, обратную дифференцированию — интегрирование. Итак,

$$\frac{dy(t)}{dt} = p y(t);$$

$$\int_0^{\infty} y(t) dt = \frac{y(t)}{p}.$$

Уравнение (1.8) может быть переписано в следующем виде:

$$y(t) \left(\frac{a_1}{a_0} p + 1 \right) = \frac{b_0}{a_0} x(t). \quad (1.9)$$

Аналогично могут быть записаны дифференциальные уравнения более высокого порядка, имеющие производные в правой части:

$$D(p) y(t) = B(p) x(t), \quad (1.10)$$

где $D(p)$ и $B(p)$ — многочлены от p .

Такая форма записи уравнений носит название операторной и обычно используется при составлении уравнений систем или звеньев.

Уравнения типов (1.9) и (1.10) легче решать как алгебраические относительно p , но для этого необходимо преобразовать функции переменных $y(t)$ и $x(t)$ в функции другой переменной — p , т. е. в $Y(p)$ и $X(p)$. Это преобразо-

вание можно, в частности, осуществить с помощью интеграла Лапласа — Карсона [1]

$$p \int_0^{\infty} y(t) e^{-pt} dt = Y(p). \quad (1.11)^*$$

После интегрирования и подстановки пределов 0 и ∞ вместо t получится выражение, не содержащее t и зависящее от p , т. е. $Y(p)$, в котором p рассматривается уже не как символ дифференцирования, а как аргумент.

Функция $y(t)$, которая подвергается преобразованию, называется *оригиналом*, а функция $Y(p)$, получаемая в результате преобразования, — ее *изображение*: $L[y(t)]$.

Рассмотрим некоторые примеры нахождений изображений.

Изображение ступенчатой функции

$$\begin{aligned} x(t) & \text{ при } t < 0; \\ x(t) &= x_1 \text{ при } t > 0. \end{aligned}$$

Подставив значение $x(t) = x_1$ в подынтегральное выражение (1.1), найдем

$$X(p) = p \int_0^{\infty} x_1 e^{-pt} dt = -x_1 p \frac{e^{-pt}}{p} \Big|_0^{\infty} = x_1. \quad (1.12)$$

Следовательно, изображение постоянной величины равно самой этой величине.

Изображение производной функции

Пусть $Y(p)$ служит изображением функции $y(t)$. Найдем изображение производной функции $y(t)$. Подставим функцию $dy(t)/dt$ в подынтегральное выражение (1.1) и проинтегрируем его по частям:

$$L\left[\frac{dy(t)}{dt}\right] = p \int_0^{\infty} \frac{dy(t)}{dt} e^{-pt} dt = pe^{-pt} y(t) \Big|_0^{\infty} + pp \int_0^{\infty} y(t) e^{-pt} dt.$$

Первый член полученного выражения равен $-pY(0)$, второй представляет собой

$$p \left(p \int_0^{\infty} y(t) e^{-pt} dt \right),$$

т. е. $pY(p)$.

* Заметим, что интеграл (1.11) зависит лишь от значений преобразуемой функции $y(t)$, которые существуют в интервале времени от 0 до ∞ .

Следовательно,

$$L\left[\frac{dy(t)}{dt}\right] = pY(p) - pY(0).$$

При $Y(0) = 0$

$$L\left[\frac{dy(t)}{dt}\right] = pY(p). \quad (1.13)$$

Изображение производной $dy(t)/dt$ получается умножением на p изображения функции $y(t)$.

Изображение интеграла

Из определения интеграла следует:

$$\frac{d}{dt} \int_0^{\infty} y(t) dt = y(t).$$

Поэтому на основании (1.13) можно написать

$$L[y(t)] = pL\left[\int_0^{\infty} y(t) dt\right], \quad (1.14)$$

откуда

$$L\left[\int_0^{\infty} y(t) dt\right] = \frac{L[y(t)]}{p} = \frac{Y(p)}{p}. \quad (1.15)$$

Изображение интеграла $\int_0^{\infty} y(t) dt$ получается делением на p изображения $y(t)$.

Вернемся к (1.1), записанному в операторной форме. При

$$\begin{aligned} x(t) &= x_1 \\ a_1 p y(t) + a_0 y(t) &= b_0 x_1. \end{aligned}$$

Далее запишем его изображение с учетом условий (1.12) и (1.13)

$$a_1 p y(p) + a_0 y(p) = b_0 x_1. \quad (1.16)$$

Нетрудно заметить, что (1.16) можно получить из (1.8) простой подстановкой p вместо t и x_1 вместо $x(t)$. Аналогично можно получить изображение уравнения (1.10)

$$D(p) y(p) = B(p) X(p), \quad (1.17)$$

где p — символ дифференцирования: $D(p)$ и $B(p)$ — многочлены от p (операторные многочлены); $Y(p)$ и $X(p)$ —

изображения регулируемой (выходной) величины и возмущающего воздействия (входной).

Найдем отношение

$$Y(p)/X(p) = B(p)/D(p). \quad (1.18)$$

Отношение изображения выходной величины к изображению входной величины называется *передаточной функцией (оператором) звена* (группы звеньев, системы).

Для системы, описываемой уравнением (1.9) при нулевых начальных условиях [при $y(0), x(0)=0$ и равенстве нулю производных от $y(t)$ и $x(t)$ при $t=0$], передаточная функция

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{b_0}{a_0} \frac{1}{1 + \frac{a_1}{a_0} p}. \quad (1.19)$$

На основе (1.18) и (1.19) можно заключить, что оператор звена или системы равен отношению операторных многочленов правой и левой частей их уравнений.

Временные характеристики. В зависимости от формы возмущающего воздействия существуют различные виды временных характеристик, из которых наиболее распространены переходные и импульсные. *Переходной характеристикой* (кривой разгона) звена (системы) называют зависимость изменения выходной величины от времени — $y(t)$ при приложении ко входу звена однократного ступенчатого возмущающего воздействия — $x(t)=x_1$ при нулевых начальных условиях. Ступенчатое возмущение может быть приложено со стороны возмущающего, регулирующего или управляющего воздействия. Переходная характеристика звена (системы) по интересующему нас каналу воздействий может быть получена экспериментально на действующей установке (ее модели) или аналитически путем решения дифференциального уравнения звена, т. е. определения $y(t)$ при $x(t)=x_1$. Пример кривой разгона промышленного объекта приведен на рис. 1.11.

Составление дифференциальных уравнений сложных систем — процесс трудоемкий, требующий высокой квалификации специалиста, в то время как опыты по определению переходных характеристик сравнительно просты. Кроме того, существуют математические и графоаналитические методы определения дифференциального уравнения звена и его передаточной функции по экспериментальной кривой разгона.

Убедимся в этом на следующем примере. Переходную характеристику можно определить аналитически, решив дифференциальное уравнение звена. Решением уравнения (1.9) для $x(t)=x_1$ будет экспонента вида

$$y(t) = \frac{b_0}{a_0} x_1 (1 - e^{p_1 t}), \quad (1.20)$$

где p_1 — корень характеристического уравнения (1.9):

$$\frac{a_1}{a_0} p_1 + 1 = 0,$$

откуда

$$p_1 = -a_0/a_1. \quad (1.21)$$

С учетом (1.21)

$$y(t) = \frac{b_0}{a_0} x_1 \left(1 - e^{-\frac{1}{a_1/a_0} t} \right). \quad (1.22)$$

График $y(t)$ изображен на рис. 1.14. В установившемся режиме (при $t \rightarrow \infty$)

$$y_{уст} = y(\infty) = \frac{b_0}{a_0} x_1.$$

Отношение $k = y(\infty)/x_1 = b_0/a_0$ назовем коэффициентом усиления звена.

Коэффициент усиления (звена системы) k равен отношению установившегося значения выходной величины к значению ступенчатого возмущения.

Уравнение экспоненты при единичном возмущении имеет вид:

$$y(t) = 1 - e^{-t/T}. \quad (1.23)$$

Величина $T = a_1/a_0$ называется *постоянной времени экспоненты*. На рис. 1.14 она соответствует отрезку на линии установившегося значения выходной величины, отсекаемому касательной $00'$. Постоянная времени звена T численно равна времени достижения регулируемой величиной установившегося значения при условии ее изменения с постоянной скоростью, равной скорости изменения в момент нанесения единичного ступенчатого возмущения. Численное значение T можно определить из (1.23), проинтегрировав обе его части:

$$\int_0^\infty 1 dt - \int_0^\infty y(t) dt = -Te^{-\frac{t}{T}} \Big|_0^\infty, \quad (1.24)$$

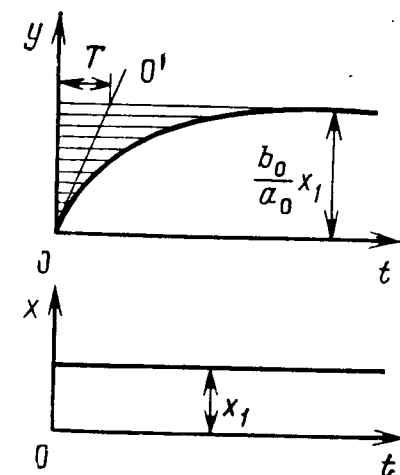


Рис. 1.14. График экспоненты

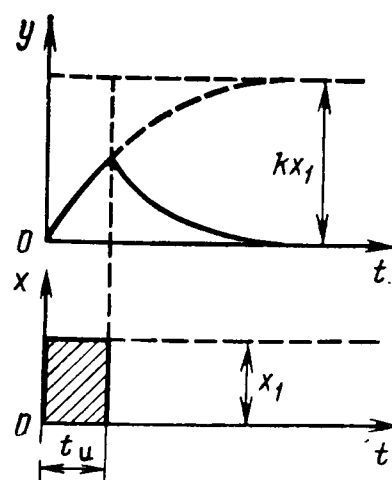


Рис. 1.15. Импульсная характеристика $y(t_u)$

откуда T равна разности площадей, заключенных под прямой $y(\infty) = kx_1$ и экспонентой $y(t)$, т. е. заштрихованной площади на рис. 1.14.

С учетом введенных обозначений (1.22) примет вид:

$$y(t) = kx_1(1 - e^{-t/T}), \quad (1.25)$$

а передаточная функция (1.19) переписывается в виде

$$W(p) = \frac{k}{1 + Tp}. \quad (1.26)$$

Таким образом, располагая опытной кривой разгона и определяя по ней k и T , можно получить выражение передаточной функции для звена, описываемого дифференциальным уравнением 1-го порядка.

Импульсной характеристикой звена (системы) называют зависимость изменения выходной величины от времени при приложении ко входу звена возмущающего воздействия импульсной формы. График импульсной характеристики $y(t_u)$ для звена, описываемого уравнением (1.25), приведен на рис. 1.15. Необходимость определения импульсной характеристики возникает в том случае, когда ожидаемое установившееся значение $y(\infty)$ превышает ее максимально допустимый размер по условиям эксплуатации.

Частотные характеристики

Частотные характеристики определяют путем приложения ко входу звена возмущающего воздействия синусоидальной (гармонической) формы, например, перемещением регулирующего органа исследуемого объекта по закону

$$x(t) = |x| \sin \omega t, \quad (1.27)$$

где $|x|$ — амплитуда колебаний входного сигнала; $\omega = 2\pi/T$ — его угловая частота, имеющая размерность рад/с или рад/мин; T — период колебаний, с или мин.

При установившихся колебаниях $x(t)$, если звено или исследуемый объект является линейным, сигнал на его выходе также изменяется по гармоническому закону с той же

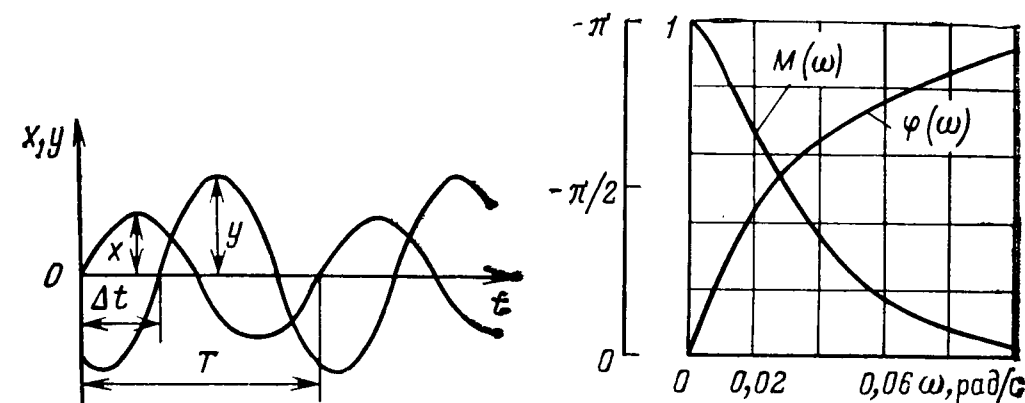


Рис. 1.16. Реакция звена на гармоническое входное воздействие

Рис. 1.17. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики парового котла типа ТП-87 по давлению перегретого пара по каналу регулирующего воздействия (расход топлива)

частотой ω , но его амплитуда и сдвиг по фазе могут изменяться в зависимости от динамических свойств звена (рис. 1.16):

$$y(t) = |y| \sin(\omega t - \varphi), \quad (1.28)$$

где $|y|$ — амплитуда выходных колебаний; φ — сдвиг по фазе.

На рис. 1.16 выходные колебания отстают по фазе от входных на время Δt или угол $\varphi = \frac{2\pi}{T} \Delta t = \omega \Delta t$. Если выходные колебания опережают входные, то

$$y(t) = |y| \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.29)$$

Динамические частотные свойства линейных звеньев определяются отношением выходного и входного сигналов по амплитудам и фазе.

Зависимость отношения амплитудного сигнала к амплитуде входного (измеренных при одной и той же частоте) от частоты колебаний входного гармонического сигнала называется *амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)*:

$$M(\omega) = \frac{|y|}{|x|}(\omega). \quad (1.30)$$

Зависимость сдвига фаз между выходным и входным сигналами (измеренного при одной и той же частоте) от

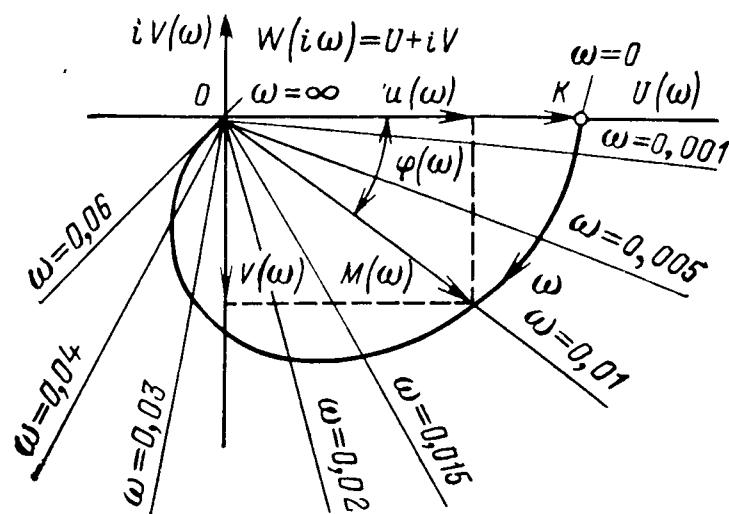


Рис. 1.18. Комплексная частотная характеристика парового котла по давлению перегретого пара

частоты колебаний входного гармонического сигнала называется *фазочастотной* характеристикой (ФЧХ):

$$\varphi(\omega) = \omega \Delta t. \quad (1.31)$$

Примеры графиков $M(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ для промышленного объекта изображены на рис. 1.17. Важную роль при изучении процессов регулирования играют характеристики, являющиеся комплексом частотных характеристик $M(\omega)$ и $\varphi(\omega)$, — *комплексные частотные характеристики* (КЧХ).

Комплексные характеристики строятся в полярных координатах R, φ или на комплексной плоскости U, iV и представляют собой годограф вектора (кривая, описываемая концом вектора), построенного из начала координат для различных значений частот — от $\omega=0$ до $\omega=\infty$. Модуль этого вектора равен $M(\omega)$, а аргумент или угол поворота — $\varphi(\omega)$. Численные значения $M(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ берутся для одной и той же частоты из графиков частотных характеристик, изображенных на рис. 1.17. Векторное изображение комплексного числа и порядок построения КЧХ на комплексной плоскости при изменении ω от 0 до ∞ иллюстрируются на рис. 1.18.

Значение КЧХ при $\omega=0$ откладывают по оси абсцисс; при отставании выходных колебаний от входных угол поворота откладывают в направлении по часовой стрелке, при опережении — против часовой стрелки.

Запись КЧХ в полярных координатах имеет вид (первая форма записи)

$$1) W(i\omega) = R e^{i\varphi(\omega)}, \quad (1.32)$$

где

$$R = M(\omega) = \frac{|y|}{|x|}(\omega); \quad \varphi(\omega) = \omega \Delta t.$$

Запись КЧХ в прямоугольных координатах на комплексной плоскости имеет вид (вторая форма записи)

$$2) W(i\omega) = U(\omega) + iV(\omega), \quad (1.33)$$

где $U(\omega) = M(\omega) \cos \varphi(\omega)$ — вещественная часть вектора КЧХ; $V(\omega) = M(\omega) \sin \varphi(\omega)$ — его мнимая часть.

Длина вектора или его модуль

$$M(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)};$$

аргумент, или угол поворота вокруг начала координат,

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}.$$

Третья форма записи КЧХ имеет вид

$$3) W(i\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)} e^{i \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}}. \quad (1.34)$$

Аналитически КЧХ может быть определена из выражения передаточной функции звена $W(p)$. Для этого установим связь между ними на примере звена с оператором (1.26):

$$W(p) = \frac{k}{1 + T p}.$$

Векторная форма записи гармонических колебаний: для входного сигнала

$$x = |x| e^{i\omega t}; \quad (1.35)$$

для выходного сигнала

$$y = |y| e^{i[\omega t - \varphi(\omega)]} = |y| e^{i\omega t} e^{-i\varphi(\omega)}. \quad (1.36)$$

Подставляя (1.35) и (1.36) в (1.1) и учитывая, что $b_0/\hat{a}_0 = k$ и $a_1/a_0 = T$, получаем

$$[1 + (i\omega)T] |y| e^{-i\varphi(\omega)} e^{i\omega t} = k |x| e^{i\omega t}, \quad (1.37)$$

откуда

$$W(i\omega) = \frac{|y|}{|x|}(\omega) e^{-i\varphi(\omega)} = \frac{k}{[1 + (i\omega)T]}. \quad (1.38)$$

Из сравнения $W(p)$ (1.26) и $W(i\omega)$ (1.38) следует, что последняя зависимость может быть получена из передаточной функции заменой оператора p на $i\omega$. Преобразование передаточной функции в КЧХ с помощью формальной математической операции — подстановки $i\omega$ вместо p — имеет определенный физический смысл, поскольку КЧХ отражает реакцию звена на входное гармоническое воздействие и может быть получена экспериментально.

1.5. ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗВЕНЬЯ

Сложные промышленные системы регулирования (объекты и регуляторы) удобнее и проще изучать, если их условно разбить на более простые элементы или звенья. Динамические свойства простых элементов целесообразно описывать с помощью *типовых* динамических звеньев. Тип звена однозначно определяется видом переходного процесса при одном и том же входном воздействии и не зависит от его физической природы. Звенья, характеризующиеся простой математической зависимостью между входной и выходной величинами, называются *элементарными*. Обычно динамические свойства элементарных звеньев описываются линейными дифференциальными уравнениями не выше второго порядка.

Рассмотрим типовые элементарные звенья, с помощью которых представляются сложные системы регулирования.

Усилительное звено. Рассмотрим простую электрическую цепь (рис. 1.19). Для нее

$$U_{вх} = I(R_1 + R_2); \quad U_{вых} = IR_2. \quad (1.39)$$

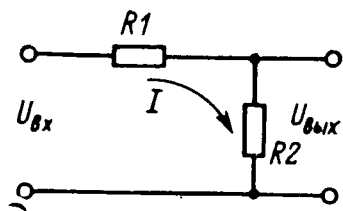


Рис. 1.19. Электрическая цепь — усилительное звено ($K_y < 1$)

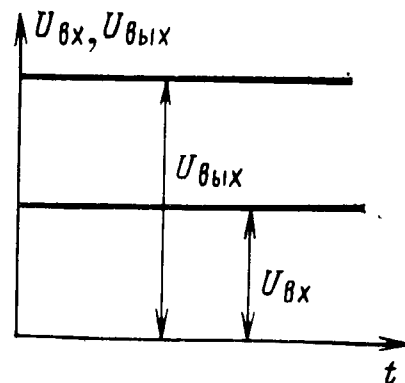


Рис. 1.20. Временная разгонная характеристика усилительного звена

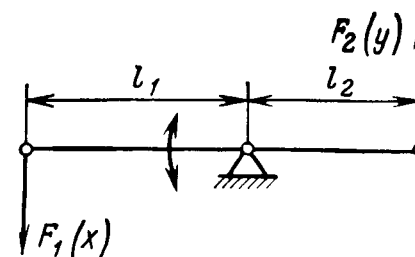


Рис. 1.21. Механический аналог усилительного звена — поворотный рычаг

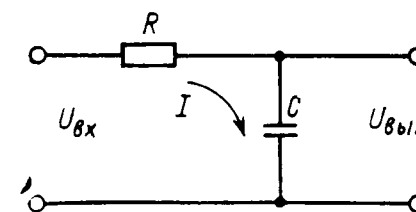


Рис. 1.22. RC-цепочка — инерционное звено

Отсюда

$$U_{вых}/U_{вх} = R_2/(R_1 + R_2) = k \quad (1.40)$$

и

$$U_{вых} = kU_{вх} \quad \text{или} \quad y = kx, \quad (1.41)$$

где k — коэффициент усиления.

Если входной сигнал изменить скачком, как это показано на рис. 1.20, то и $U_{вых}$ изменится мгновенно. Поэтому рассматриваемое звено называется *безынерционным* или *усилительным*. Математическим описанием усилительного звена служит уравнение (1.41). На рис. 1.20 изображена кривая разгона усилительного звена.

Передаточная функция усилительного звена $W(p) = k$, его КЧХ также равна k и изображается точкой на вещественной оси.

Усилительные звенья часто встречаются в электрических цепях и механических передачах, примером такого звена служит рычаг для преобразования усилий (рис. 1.21) при $k = l_1/l_2$.

Инерционное звено I порядка. Рассмотрим электрическую цепь (рис. 1.22). Приложение на входе цепи напряжения $U_{вх}$ вызывает в ней переходный процесс. Ток $I_R = I_C$, причем

$$I_R = \frac{U_{вх} - U_{вых}}{R}; \quad (1.42)$$

$$I_C = C \frac{dU_{вых}(t)}{dt}. \quad (1.43)$$

Приравняв (1.42) и (1.43), получим

$$RC \frac{dU_{вых}(t)}{dt} + U_{вых}(t) = U_{вх}(t). \quad (1.44)$$

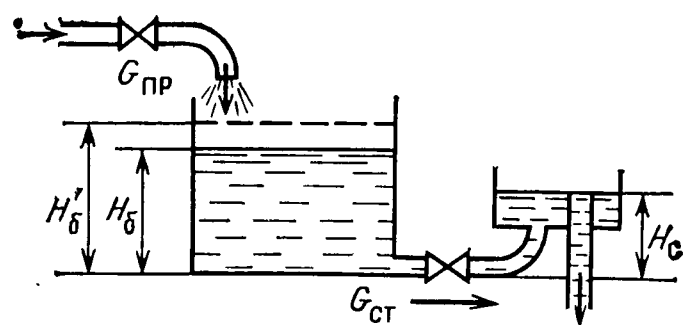


Рис. 1.23. Гидравлическая модель инерционного звена

Произведение $RC = T$, следовательно,

$$T \frac{dU_{\text{вых}}(t)}{dt} + U_{\text{вых}}(t) = U_{\text{вх}}(t). \quad (1.45)$$

Это уравнение тождественно (1.1). Решение его относительно $U_{\text{вых}}(t)$ при скачкообразном изменении $U_{\text{вх}}(t)$ уже рассматривалось [формула (1.25), рис. 1.14]. Другим примером инерционного звена может служить односторонний бак с постоянным подпором воды на стоке (рис. 1.23).

Действительно, при возмущении расходом воды на притоке (например, при увеличении притока на $\Delta G_{\text{пр}}$) уровень воды в баке не будет возрастать безгранично, так как с ростом $H_{\text{б}}$ увеличивается перепад давлений на кране стока, расход через который описывается выражением $G_{\text{ст}} = \alpha \sqrt{H_{\text{б}} - H_{\text{с}}}$, где α — коэффициент расхода. При некотором постоянном значении $H'_{\text{б}}$ возросший сток сравняется с $G'_{\text{пр}} = G_{\text{о.пр}} + \Delta G_{\text{пр}}$. Наступит новое состояние равновесия системы при новом установившемся значении уровня.

Кривая разгона этого элементарного звена, называемого *инерционным* или *апериодическим*, представляет собой экспоненту, изображенную на рис. 1.14. Реакция этого звена на импульсное возмущение (импульсная характеристика) приведена на рис. 1.15. Передаточная функция и КЧХ инерционного звена соответствуют выражениям (1.26) и (1.38). Построим график КЧХ инерционного звена. Для этого представим (1.38) в виде алгебраической суммы вещественной и мнимой частей

$$W(j\omega) = \frac{k}{1 + i\omega T} = \frac{k}{1 + \omega^2 T^2} - i \frac{k\omega T}{1 + \omega^2 T^2}. \quad (1.46)$$

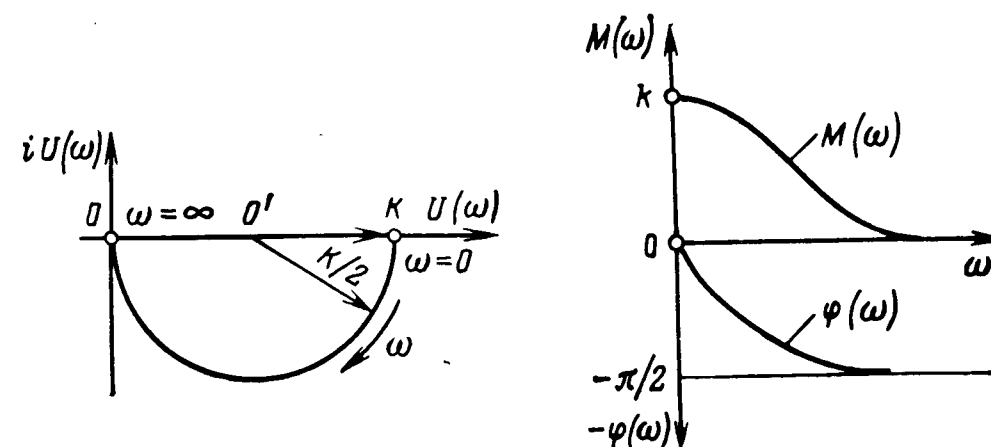


Рис. 1.24. $W(i\omega)$ инерционного звена

Рис. 1.25. $M(\omega)$ и $\phi(\omega)$ инерционного звена

При изменении ω от 0 до ∞ годограф вектора $W(i\omega)$ можно получить из (1.46), в котором

$$U(\omega) = \frac{k}{1 + \omega^2 T^2}; \quad V(\omega) = -\frac{k\omega T}{1 + \omega^2 T^2}. \quad (1.47)$$

Отношение $V(\omega)/U(\omega) = -\omega T$, тогда

$$U(\omega) = \frac{k}{1 + \frac{V^2(\omega)}{U^2(\omega)}} = \frac{kU^2(\omega)}{U^2(\omega) + V^2(\omega)},$$

откуда $U^2(\omega) + V^2(\omega) - kU(\omega) = 0$. Прибавив к обеим частям последнего равенства $k^2/4$, получим

$$[U(\omega) - k/2]^2 + V^2(\omega) = k^2/4. \quad (1.48)$$

Выражение (1.48) служит уравнением полуокружности с радиусом $k/2$, касающейся мнимой оси в начале координат, с центром O' , расположенным на вещественной оси (рис. 1.24).

АЧХ и ФЧХ инерционного звена определяются из выражений (1.34) и (1.47):

$$M(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)} = \frac{k}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}; \quad (1.49)$$

$$\phi(\omega) = \arctg \left[-\frac{V(\omega)}{U(\omega)} \right] = \arctg \omega T. \quad (1.50)$$

Функции $M(\omega)$ и $\phi(\omega)$ изображены на рис. 1.25.

Из (1.50) и графиков на рис. 1.16 и 1.25 видно, что при прохождении сигнала через инерционное звено выходной

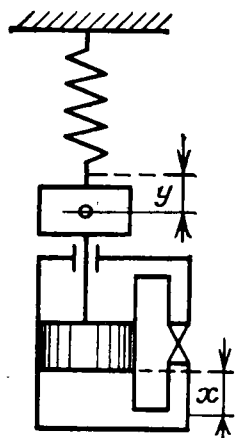


Рис. 1.26. Гидромеханический аналог колебательного звена

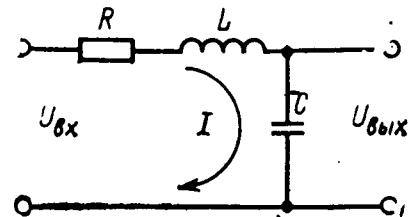


Рис. 1.27. RCL-цепочка — колебательное звено

сигнал отстает по фазе от входного. Звенья такого типа называются *фазосдвигающими*.

Инерционное звено II порядка. Инерционное звено II порядка образуется при наличии двух соединенных емкостей, способных запасать энергию и обмениваться ею. Примерами инерционных звеньев II порядка могут служить механическая система (рис. 1.26), представляющая собой массу, подвешенную на пружине и имеющую демпфирующее устройство, и электрическая цепь, содержащая емкость, индуктивность и омическое сопротивление (рис. 1.27).

Для электрической цепи, изображенной на рис. 1.27, можно записать

$$U_{\text{вх}}(t) - U_{\text{вых}}(t) = IR + L \frac{dI}{dt},$$

где

$$I = CdU_{\text{вых}}(t)/dt.$$

Подставив I в исходное уравнение, получим

$$U_{\text{вх}}(t) = U_{\text{вых}}(t) + CR \frac{dU_{\text{вых}}(t)}{dt} + LC \frac{d^2U_{\text{вых}}(t)}{dt^2}.$$

Обозначив $CR = T_1$, $LC = T_2^2$, получим уравнение связи между выходным и входным сигналами

$$T_2^2 \frac{d^2U_{\text{вых}}(t)}{dt^2} + T_1 \frac{dU_{\text{вых}}(t)}{dt} + U_{\text{вых}}(t) = U_{\text{вх}}(t).$$

Дифференциальное уравнение инерционного звена II порядка: в общем виде

$$T_2^2 \frac{d^2y(t)}{dt^2} + T_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t); \quad (1.51)$$

в операторной форме

$$T_2^2 p^2 y(t) + T_1 p y(t) + y(t) = kx(t), \quad (1.52)$$

где T_2 и T_1 — коэффициенты имеющие размерность времени; k — коэффициент усиления, равный отношению установившихся значений выходной и входной величин.

Решение уравнений (1.51) и (1.52) можно найти, определив в начале корни их характеристического уравнения

$$T_2^2 p^2 + T_1 p + 1 = 0. \quad (1.53)$$

Корни уравнения (1.53)

$$p_{1,2} = -\frac{T_1}{2T_2^2} \pm \frac{\sqrt{T_1^2 - 4T_2^2}}{2T_2^2}.$$

Временная переходная характеристика [решение (1.51)] зависит от вида корней $p_{1,2}$.

При этом могут быть два случая:

1) $T_1^2 \geq 4T_2^2$ ($\frac{T_1}{T_2} \geq 2$); корни характеристического уравнения являются вещественными

$$p_1 = -\alpha_1; \quad p_2 = -\alpha_2$$

или

$$p_{1,2} = -\alpha.$$

При неравных корнях $p_1 \neq p_2$

$$y(t) = kx(t) \left[1 - \frac{\alpha_2}{(\alpha_2 - \alpha_1)} e^{-\alpha_1 t} + \frac{\alpha_1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} e^{-\alpha_2 t} \right]. \quad (1.54)$$

При равных корнях $p_1 = p_2 = -\alpha$

$$y(t) = kx(t) [1 - e^{-\alpha t} (1 + \alpha t)]. \quad (1.55)$$

Оба выражения представляют собой аperiodические процессы с $y(t) \rightarrow kx(t)$ при $t \rightarrow \infty$ (рис. 1.28, кривая 1).

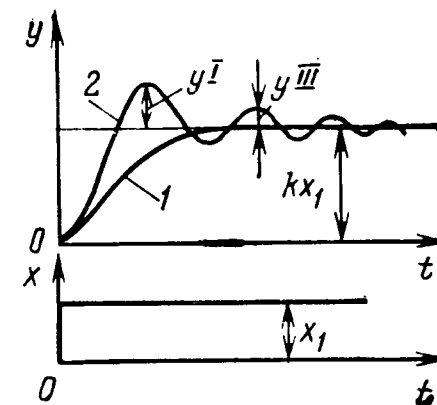


Рис. 1.28. Временная (разгонная) характеристика инерционного звена II порядка:

1 — аperiodического; 2 — колебательного

2) $T_1^2 < 4T_2^2$ или $T_1/T_2 < 2$; корни характеристического уравнения (1.52) являются комплексными сопряженными с равной отрицательной вещественной частью

$$p_{1,2} = -\alpha \pm i\beta; \quad \beta = \frac{\sqrt{4T_2^2 - T_1^2}}{2T_2^2}. \quad (1.56)$$

Временная характеристика

$$y(t) = kx(t) \left[1 - e^{-\alpha t} \left(\frac{\alpha}{\beta} \sin \beta t + \cos \beta t \right) \right]. \quad (1.57)$$

Это выражение представляет собой затухающий колебательный процесс с $y(t) \rightarrow kx(t)$ при $t \rightarrow \infty$ (рис. 1.28, кривая 2).

Инерционные звенья II порядка, имеющие переходную характеристику колебательной формы, называются *колебательными*. Характер процесса, изображенного на рис. 1.28, оценивается степенью затухания ψ , равной отношению разности двух соседних амплитуд к первой из них по ходу процесса:

$$\psi = (y^I - y^{III})/y^I. \quad (1.58)$$

Передаточная функция колебательного звена может быть получена из (1.52) заменой p на $i\omega$:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{k}{1 + T_1 p + T_2^2 p^2}. \quad (1.59)$$

КЧХ колебательного звена (рис. 1.29, а) можно получить подстановкой $p = i\omega$ в уравнение (1.59)

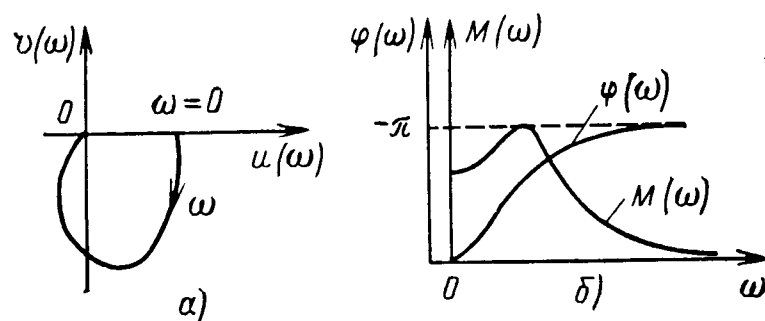


Рис. 1.29. Частотные характеристики колебательного звена:
а — $W(i\omega)$; б — $M(\omega)$, $\varphi(\omega)$

$$W(i\omega) = \frac{k}{1 + i\omega T_1 - \omega^2 T_2^2} = \frac{k}{\sqrt{(1 - \omega^2 T_2^2)^2 + \omega^2 T_1^2}} e^{-i \arctg \frac{\omega T_1}{1 - \omega^2 T_2^2}}. \quad (1.60)$$

АЧХ и ФЧХ колебательного звена изображены на рис. 1.29, б.

Интегрирующее звено. Рассмотрим поведение уровня воды в баке, на выходе которого установлен откачивающий насос (см. рис. 1.13). Математическое описание этого объекта при возмущении расходом воды на притоке дано уравнением (1.7).

Проинтегрировав его обе части, получим

$$y(t) = k_n \int_0^t x(t) dt. \quad (1.61)$$

В операторной форме

$$Y(p)/X(p) = W(p) = k_n/p. \quad (1.62)$$

Звенья с интегральной математической зависимостью между выходной и входной величинами называются *интегрирующими*.

Интегрирующие звенья часто встречаются в промышленных системах автоматического регулирования. К ним относятся объекты, связанные с регулированием уровней жидкости в открытых баках и сосудах под давлением, исполнительные механизмы автоматических регуляторов и др. Интегрирующее звено, так же как и инерционное, принадлежит к фазосдвигающим.

Переходная характеристика интегрирующего звена или его реакция на скачкообразное возмущение x_1 , как следует из (1.61), есть прямая, выходящая из начала координат (рис. 1.30, а) под углом α :

$$y(t) = k_n t, \quad (1.63)$$

где $k_n = \text{tg} \alpha / x$ — коэффициент пропорциональности интегрирующего звена, характеризующий скорость нарастания сигнала на выходе после нанесения ступенчатого возмущения.

Импульсная характеристика звена представлена на рис. 1.30 пунктирной линией б. Сигнал $y(t)$ остается неиз-

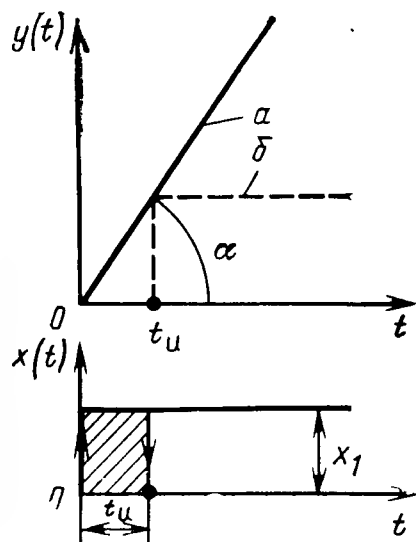


Рис. 1.30. Временные характеристики интегрирующего звена:

a — разгонная; b — импульсная

менным после $t=t_n$, так как $x_1 = 0$ при $t > t_n$. Подстановкой $p = i\omega$ в уравнение (1.62) можно определить КЧХ звена

$$W(i\omega) = k_n / i\omega. \quad (1.64)$$

Освободившись от мнимости в знаменателе, получим

$$W(i\omega) = -i \frac{k_n}{\omega}. \quad (1.65)$$

Как следует из (1.65), КЧХ интегрирующего звена не имеет вещественной части и располагается вдоль мнимой отрицательной полуоси (рис. 1.31, a).

Характеристики АЧХ и ФЧХ (рис. 1.31, b) определяются из следующих выражений:

$$M(\omega) = \sqrt{0 + V^2(\omega)} = \frac{k_n}{\omega}; \quad (1.66)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{0} = -\arctg \infty = -\frac{\pi}{2}. \quad (1.67)$$

Звено запаздывания. На рис. 1.32 изображен ленточный транспортер для переброски сыпучего материала из одного бункера в другой. Особенность его работы как отдельного звена заключается в том, что входной сигнал, проходя через него, не претерпевает изменений по амплитуде, но

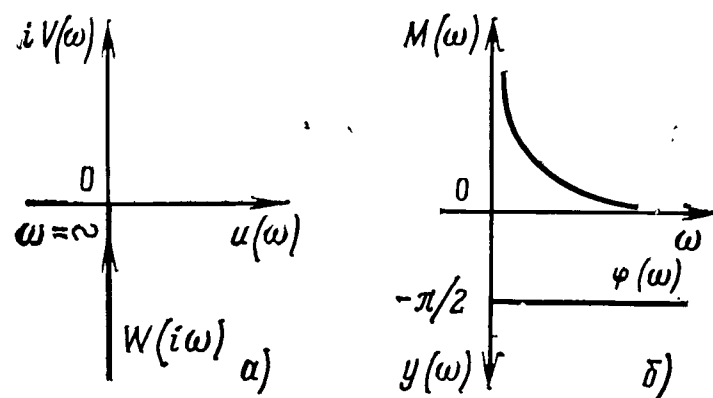
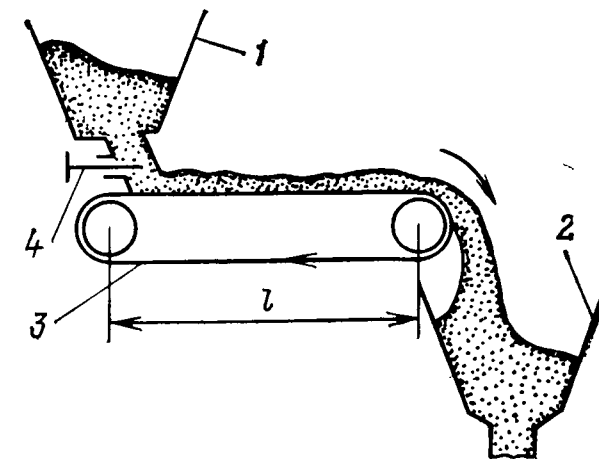


Рис. 1.31. Частотные характеристики интегрирующего звена: a — $W(i\omega)$; b — $M(\omega)$ и $\varphi(\omega)$

Рис. 1.32. Ленточный транспортер — дозатор — звено запаздывания:

1, 2 — бункера; 3 — лента; 4 — шиббер-дозатор



сдвигается во времени (по фазе). Иными словами, если изменить количество поступающего на ленту материала, то точно такое же изменение произойдет на выходе ленты через время $\tau = l/v$, где l — длина транспортной ленты; v — скорость ее движения. Время τ называется временем *транспортного* или *чистого* запаздывания.

Технические устройства, обладающие свойством «задержки» во времени поступающего на вход сигнала без изменения его значения, относятся к звеньям транспортного или чистого запаздывания. Примером звена транспортного запаздывания на тепловых электрических станциях служат также сравнительно длинные участки трубопровода. Математическое описание звена запаздывания в функции времени имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} y(t) &= 0 & \text{при } t \leq \tau; \\ y(t) &= x(t) & \text{при } t \geq \tau. \end{aligned} \right\} \quad (1.68)$$

Временная характеристика звена запаздывания имеет вид скачка, сдвинутого во времени относительно момента возмущения на отрезок τ (рис. 1.33).

Если подать на вход звена транспортного запаздывания синусоидальный сигнал, то на выходе получим синусоиду той же амплитуды, сдвинутую во времени на постоянную величину τ независимо от частоты. При этом фазовый сдвиг, выраженный в градусах или радианах, ли-

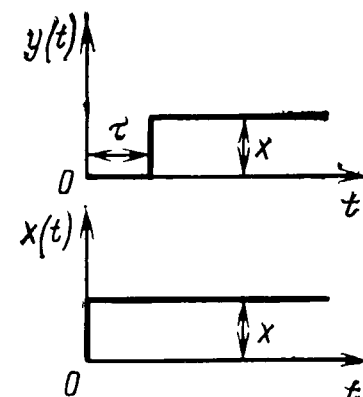


Рис. 1.33. Временная (разгонная) характеристика запаздывающего звена

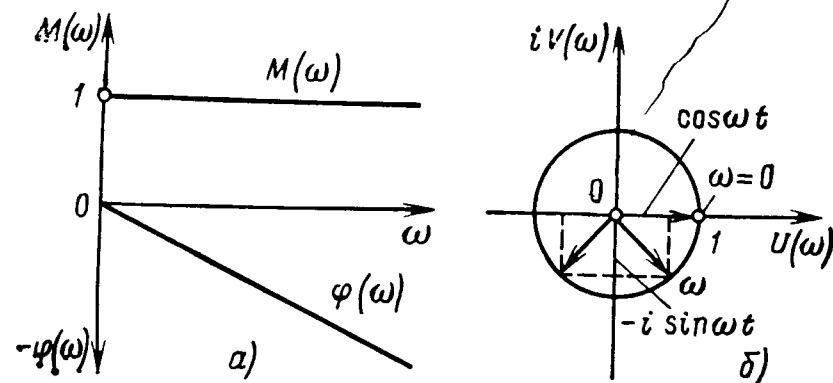


Рис. 1.34. Частотные характеристики звена запаздывания: а — $M(\omega)$ и $\varphi(\omega)$; б — $W(i\omega)$

нейно зависит от частоты:

$$\varphi(\omega) = -\frac{2\pi}{T} \tau,$$

или

$$\varphi(\omega) = -\omega\tau. \quad (1.69)$$

Графиком ФЧХ звена транспортного запаздывания $\varphi(\omega)$ согласно (1.69) служит прямая, исходящая из начала координат (рис. 1.34, а). Поскольку величина входного сигнала при прохождении через звено запаздывания не изменяется, его АЧХ равна единице независимо от частоты. График $M(\omega)$ также представлен на рис. 1.34, а. Годограф вектора КЧХ звена запаздывания в показательной форме записывается в следующем виде:

$$W(i\omega) = 1e^{-i\omega\tau}. \quad (1.70)$$

По формуле Эйлера

$$e^{-i\omega\tau} = \cos \omega\tau - i \sin \omega\tau. \quad (1.71)$$

Это означает, что при изменении ω от 0 до ∞ вектор $W(i\omega)$ описывает на комплексной плоскости окружность с центром в начале координат (рис. 1.34, б). Из выражения (1.70) подстановкой $p = i\omega$ можно получить и передаточную функцию звена запаздывания

$$W(p) = e^{-p\tau}. \quad (1.72)$$

Реальное дифференцирующее звено. Инерционные, интегрирующие и запаздывающие звенья относятся к фазосдвигающим элементам АСР, в которых выходные колебания отстают по фазе от входных. На часто возникает необходимость, например в промышленных автоматических регуляторах, включать в контур автоматического регулирова-

ния звенья, у которых при установившихся колебаниях $y(t)$ опережает $x(t)$ на время Δt (см. рис. 1.16). В качестве примера такого звена рассмотрим цепь, изображенную на рис. 1.35, и составим для нее дифференциальное уравнение.

При подаче на вход цепи скачкообразного сигнала $U_{\text{вх}}$ в ней возникает переходный процесс, характеризующийся током:

$$I_R = \frac{U_{\text{вх}}(t)}{R}; \quad (1.73)$$

$$I_C = \frac{d[U_{\text{вх}}(t) - U_{\text{вых}}(t)]}{dt} C, \quad (1.74)$$

где $I_R = I_C$.
Тогда

$$U_{\text{вых}}(t) = RC \left[\frac{dU_{\text{вх}}(t)}{dt} - \frac{dU_{\text{вых}}(t)}{dt} \right].$$

или

$$U_{\text{вых}}(t) + RC U'_{\text{вых}}(t) = RC U'_{\text{вх}}(t). \quad (1.75)$$

Обозначим: $RC = T$; $U_{\text{вых}}/U_0 = y$; $U_{\text{вх}}/U_0 = x$, тогда получим

$$Ty'(t) + y(t) = Tx'(t). \quad (1.76)$$

Поскольку изменение $y(t)$ зависит от производной входного сигнала, указанное звено носит название *дифференцирующего*. Решение уравнения (1.76) при скачкообразном изменении $x(t)$ имеет вид $y(t) = e^{-t/T}$. График функции $y(t)$ (рис. 1.36) представляет собой экспоненту, характеризующую постоянную времени T , численно равной подкасающейся к кривой $y(t)$ в точке $y(0)$.

Для определения передаточной функции звена запишем (1.76) в операторной форме и получим соотношение

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = W(p) = Tp/(1 + Tp).$$

В общем виде

$$W(p) = \frac{kTp}{1 + Tp}. \quad (1.77)$$

где $k = y(0)/x$.

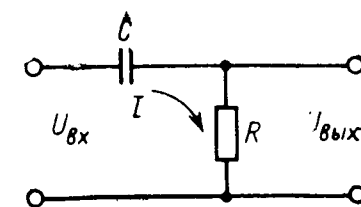


Рис. 1.35. RC-цепочка — реальное дифференцирующее звено

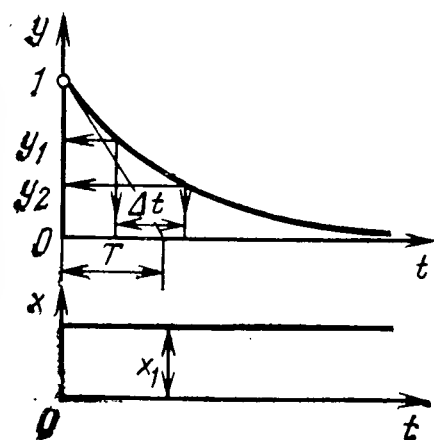
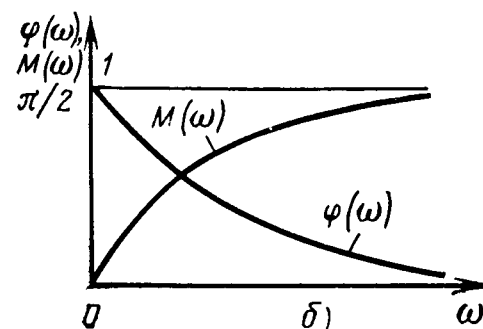
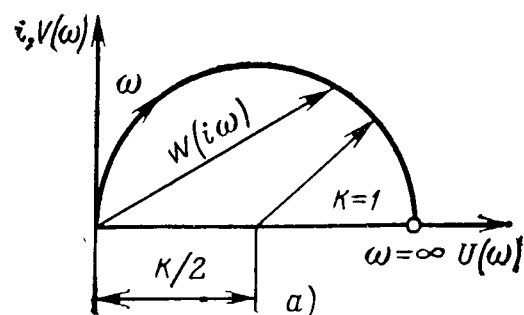


Рис. 1.36. Временная (разгонная) характеристика дифференцирующего звена

Рис. 1.37. Частотные характеристики дифференцирующего звена:
а — $W(i\omega)$; б — $M(\omega)$ и $\varphi(\omega)$



Наличие члена $(1+Tp)$ в знаменателе передаточной функции по аналогии с передаточной функцией инерционного звена свидетельствует об определенной инерции в изменении $y(t)$ по сравнению с выходным сигналом. Поэтому звено называется *реальным* дифференцирующим в отличие от *идеального*, знаменатель передаточной функции которого равен 1.

КЧХ реального дифференцирующего звена

$$W(i\omega) = \frac{k i \omega T}{1 + i \omega T} = \frac{k \omega^2 T^2}{1 + \omega^2 T^2} + i \frac{k \omega T}{1 + \omega^2 T^2}. \quad (1.78)$$

Рассмотренное звено является *фазопережающим*, так как вектор КЧХ расположен в I квадранте комплексной плоскости и имеет положительный угол поворота (направлен против часовой стрелки) (рис. 1.37, а). Графики АЧХ и ФЧХ (рис. 1.37, б) строятся по выражениям $M(\omega)$ и $\varphi(\omega)$:

$$M(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)} = \frac{k \omega T}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}; \quad (1.79)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{V}{U}(\omega) = \arctg \frac{1}{\omega T}. \quad (1.80)$$

Таблица 1.1. Сводные данные по динамическим характеристикам типовых звеньев

Наименование звена	Математическое описание	Временные характеристики $y(t)$		Оператор звена $W(p)$	Частотные характеристики		
		Разгонная	Импульсная		Амплитудно-частотная $M(\omega) = \left \frac{y}{x} \right (\omega)$	Фазо-частотная $\varphi(\omega)$	Амплитудно-фазовая $W(i\omega)$
Инерционное I порядка	$T_1 y'(t) + y(t) = kx(t)$			$\frac{k}{1 + T_1 p}$			
Инерционное II порядка (колебательное)	$T_2^2 y''(t) + T_1 y'(t) + y(t) = kx(t)$			$\frac{k}{1 + T_1 p + T_2^2 p^2}$			
Интегрирующее	$y(t) = k_u \int x(t) dt$			$\frac{k_u}{p}$			
Запаздывания	$y(t) = x(t - \tau)$			$e^{-p\tau}$			
Дифференцирующее (реальное)	$T y'(t) + y(t) = kx(t)$			$\frac{k T p}{1 + T p}$			

Сводные данные по динамическим характеристикам рассмотренных типовых звеньев приведены в табл. 1.1.

1.6. СОЕДИНЕНИЯ ЗВЕНЬЕВ

Выше указывалось, что промышленные АСР могут быть представлены в виде различных комбинаций соединений элементарных динамических звеньев. Но все эти сложные комбинации в конечном итоге могут быть сведены к трем типам соединений: параллельному, последовательному и встречно-параллельному. При определении суммарных или результирующих характеристик сложных динамических систем, представляемых в виде комбинаций элементарных или типовых звеньев, используется принцип суперпозиции, или наложения, сущность которого состоит в том, что для линейного звена результирующая реакция на возмущения равна сумме реакций на отдельные возмущающие воздействия.

Операторная и векторная (частотная) формы представления динамических свойств звеньев наиболее удобны для отыскания результирующей характеристики сложной динамической системы. При этом действия по определению результирующей характеристики сводятся к алгебраическим действиям или операциям сложения, вычитания и умножения векторов на комплексной плоскости.

Параллельное соединение. Рассмотрим динамическую систему, состоящую из двух параллельно соединенных звеньев направленного действия (рис. 1.38, а). Для сумматора С

$$y = y_1 + y_2 = xW_1 + xW_2,$$

где x и y — векторная форма записи входной и выходной величин; W — векторы КЧХ звена.

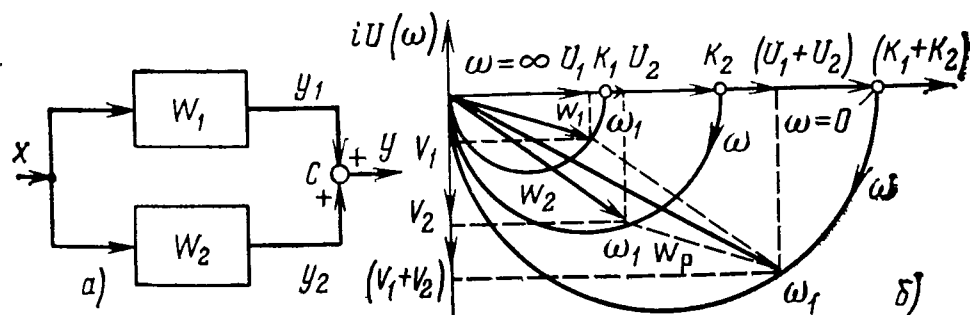


Рис. 1.38. Параллельное соединение звеньев:
а — структурная схема; б — векторная диаграмма W_1 , W_2 и W_p

Тогда

$$W_p = y/x = W_1 + W_2. \quad (1.81)$$

Для иллюстрации уравнения (1.81) рассмотрим параллельное соединение двух инерционных звеньев первого порядка. Их векторы КЧХ расположены в IV квадранте комплексной плоскости (рис. 1.38, б).

Результирующий вектор W_p для частоты ω_1 определяется по правилу сложения векторов, которое, как известно, основано на том, что при сложении двух комплексных чисел отдельно складываются их вещественные и мнимые части:

$$W_p = W_1 + W_2 = (u_1 + u_2) + i(v_1 + v_2). \quad (1.82)$$

Сложение векторов производится для всех одинаковых частот от 0 до ∞ , в результате чего и определяется суммарная КЧХ. Приведенное правило применимо и в случае параллельного соединения большего числа звеньев.

Итак, при параллельном соединении звеньев результирующая передаточная функция и результирующая КЧХ системы образуются путем сложения передаточных функций и КЧХ отдельных звеньев.

Последовательное соединение. Рассмотрим динамическую систему, состоящую из двух последовательно соединенных детектирующих звеньев с характеристиками W_1 и

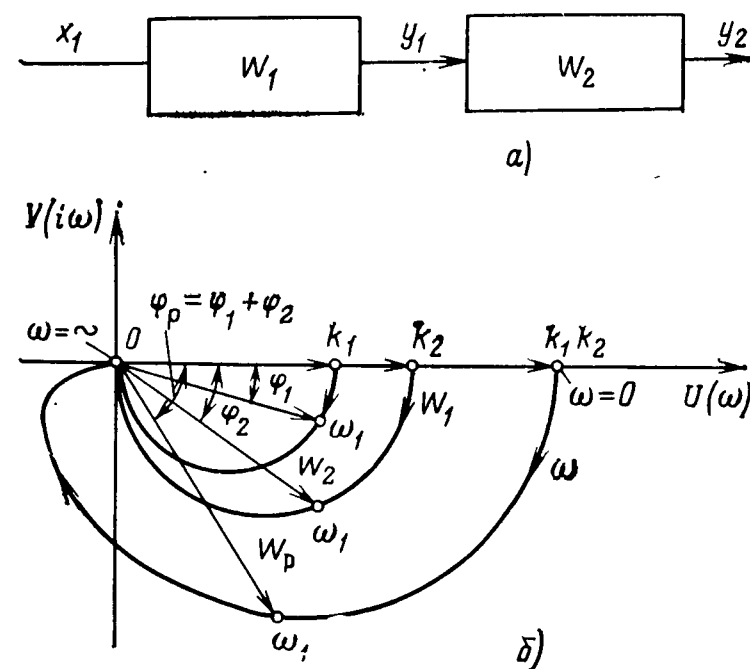


Рис. 1.39. Последовательное соединение звеньев:
а — структурная схема; б — векторная диаграмма W_1 , W_2 и W_p

W_2 (рис. 1.39, а). Для этой структурной схемы

$$y_1 = W_1 x_1; \quad (1.83)$$

$$y_2 = W_2 y_1. \quad (1.84)$$

Заменяя y_1 в (1.84) на (1.83), получим

$$y_2 = x_1 W_1 W_2. \quad (1.85)$$

откуда

$$W_p = y_2/x_1 = W_1 W_2. \quad (1.86)$$

В итоге результирующая КЧХ двух последовательно соединенных звеньев равна произведению их характеристик. При этом следует помнить, что при умножении комплексных чисел их модули перемножаются, а фазы складываются. Это правило иллюстрируется на рис. 1.39, б для случая последовательного соединения двух инерционных звеньев первого порядка. При этом годограф вектора результирующей характеристики определяется путем перемножения векторов при одинаковых частотах. Правило умножения при определении результирующей характеристики распространяется и на цепочку, состоящую из n последовательно включенных звеньев.

Итак, результирующая КЧХ динамической системы, состоящей из n последовательно включенных звеньев, равняется произведению характеристик отдельных звеньев.

Встречно-параллельное соединение. Такой тип соединения рассматривался выше (см. рис. 1.2) и соответствует замкнутой АСР, состоящей из объекта 1 и регулятора 2. Даны:

$$W_0, W_p, x, x^c, y, u, x_p.$$

Требуется найти КЧХ, или оператор замкнутой системы,

$W_{p.c} = \frac{y}{x}$ — относительно регулирующего воздействия и

$W_{u.c} = y/u$ — относительно задающего воздействия. Для системы при $u=0$ справедливы следующие соотношения:

Для объекта 1

$$y = W_0 x^c; \quad (1.87)$$

для сумматора 3

$$x^c = x - x_p, \quad (1.88)$$

где

$$x_p = W_p y. \quad (1.89)$$

Заменяем x_p в (1.88) на (1.89):

$$x^c = x - W_p y. \quad (1.90)$$

Подставим (1.90) в (1.87) и разделим переменные y и x :

$$y + W_0 W_p y = x W_0. \quad (1.91)$$

откуда получим КЧХ замкнутой системы относительно регулирующего воздействия:

$$W_{p.c}^p = \frac{y}{x} = \frac{W_0}{1 + W_0 W_p}. \quad (1.92)$$

Для определения y/x или вектора КЧХ замкнутой системы относительно задающего воздействия u составим уравнение сумматора 5

$$y^* = y - u. \quad (1.93)$$

В рассматриваемом случае ($x=0, x^c=x_p$)

$$-x_p = y_p W_p; \quad (1.94)$$

$$y_1 = W_0 x_p. \quad (1.95)$$

Заменяя в (1.95) x_p его значением из (1.94) и затем исключив y^* в уравнении (1.93), получим

$$y = W_0 W_p (u - y), \quad (1.96)$$

откуда

$$W_{u.c}^u = \frac{y}{x} = \frac{W_0 W_p}{1 + W_0 W_p}, \quad (1.97)$$

где $W_0 W_p$ — вектор КЧХ разомкнутой системы.

Передаточная функция замкнутой системы относительно ошибки регулирования $y^* = y - u$:

$$W_{y.c}^{y^*} = \frac{y^*}{u} = (1 - y/u). \quad (1.98)$$

Подставив (1.97) в (1.98), получим

$$W_{y.c}^{y^*} = \frac{1}{1 + W_0 W_p}. \quad (1.99)$$

Контрольные вопросы

1. Назовите основные элементы одноконтурной АСР.
2. Укажите на схеме места приложений регулирующего, внешнего возмущающего и управляющего воздействий.
3. Что называется обратной связью в АСР?

4. Охарактеризуйте действие следующих автоматических систем регулирования: а) автоматической системы стабилизации; б) следящих систем; в) программной системы регулирования; а) экстремальных систем.

5. Поясните работу автоматических систем, действующих по возмущению.

6. Что понимается под установившимся состоянием объекта или системы регулирования?

7. Что называется переходным процессом?

8. Что называется процессом автоматического регулирования?

9. Поясните понятия устойчивой и неустойчивой АСР.

10. Что называется статической и динамической характеристикой звена, системы?

11. Назовите формы описания динамических свойств линейных звеньев.

12. Что такое направленность (детектирование) динамических звеньев системы? Приведите примеры звеньев направленного и ненаправленного действия.

13. Что называется кривой разгона?

14. Что называется импульсной характеристикой? Нарисуйте импульсную характеристику усилительного звена.

15. Как получить частотные характеристики звена или системы?

16. Назовите виды частотных характеристик.

17. Дайте понятие оператора звена или системы.

18. Перечислите основные типовые звенья.

19. Приведите пример инерционного звена первого порядка.

20. Приведите пример звена запаздывания.

21. В чем состоит принцип суперпозиции для линейных звеньев?

22. Выведите формулу результирующего оператора: а) двух параллельно соединенных звеньев; б) двух последовательно включенных звеньев.

Глава вторая

ТЕПЛОВЫЕ ОБЪЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

2.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Процессы выработки и распределения тепловой энергии на электростанциях происходят в результате взаимодействия потоков вещества и энергии в специальных устройствах — теплообменниках.

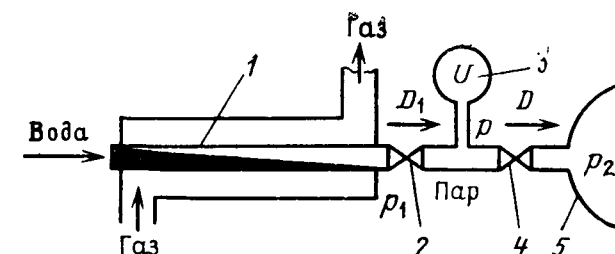


Рис. 2.1. Физическая модель парового котла и парового тракта ТЭС: 1 — парообразующая поверхность нагрева котла; 2 — сопротивление пароперегревателя; 3 — емкость парового тракта; 4 — сопротивление турбины с клапанами; 5 — конденсатор турбины

Отдельные теплообменники и их соединения, например паровые котлы, регенеративные подогреватели питательной воды и др., представляют собой *тепловые объекты управления*, объединяемые общностью динамических свойств и характеристик.

Движение потоков вещества и энергии в тепловых объектах может быть установившимся (*стационарным*) или *нестационарным*. В первом случае величины, характеризующие теплофизические свойства потоков на входе x_i и выходе y_i тепловых объектов (давление, температура, расход и др.), остаются постоянными, во втором — изменяются во времени.

В реальных условиях всегда имеют место колебания потоков энергии и вещества, однако, если эти колебания малы, режим объекта может считаться *стационарным*. Стационарные режимы описываются статическими характеристиками вида $y_i = kx_i$ (см. рис. 1.9), нестационарные — динамическими характеристиками вида $dy_i(t)/dt = f[x(t), y(t)]$ (см. рис. 1.11).

Тепловые объекты представляют собой термодинамические системы, которые можно представить в виде устройства с несколькими входными и выходными величинами, являющегося упрощенной физической моделью реального объекта. Так, упрощенная физическая модель парового котла представляет собой теплообменник типа «труба в трубе» (рис. 2.1), в кольцевом канале которого движутся продукты сгорания, а во внутреннем — рабочее тело — теплоноситель (вода или пар). Совокупность математических зависимостей в виде алгебраических или дифференциальных уравнений, описывающих взаимосвязи между входными x_i и выходными величинами y_i физической модели, образует ее математическую модель. При составлении математических моделей тепловых объектов используют модели с *сосредоточенными* и *распределенными* теплофизическими параметрами. В моделях с распределенными параметрами свойства греющих газов и рабочего тела, а также геометрические размеры каналов изменяются вдоль пути движения потоков. Математическое описание такой модели является довольно сложным. Для его упрощения в целях определе-

ния приближенных динамических характеристик тепловых объектов прибегают к составлению моделей с сосредоточенными параметрами. Масса и энергия таких систем сосредоточены в одной или нескольких материальных точках, а физические величины, характеризующие систему в каждой точке, не зависят от пространственных координат и являются лишь функциями времени, т. е. считается, что параметры в системе постоянны по длине теплообменника на конечном участке.

При таком подходе корректная (сравнительно точная) модель сложной системы или парового котла в целом может быть представлена в виде последовательного или параллельного соединения участков с сосредоточенными параметрами, представляющих собой источники вещества или энергии или гидравлические сопротивления. Физические величины, характеризующие свойства потоков вещества и энергии при таком представлении теплового объекта, зависят только от времени.

2.2. ОСНОВЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ

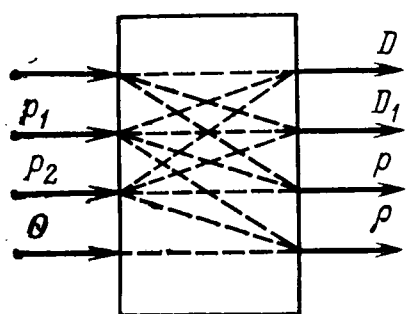
В качестве примера составления математической модели теплообменника рассмотрим процесс изменения давления пара в трубопроводе при изменении давления на входе p_1 и выходе p_2 трубопровода и при изменении степени открытия регулирующего клапана ξ . Физическая модель трубопровода (паропровода), соединяющего паровой котел с турбиной, представлена на рис. 2.1, структурная схема математической модели — на рис. 2.2.

Запишем основные уравнения термодинамики для теплового объекта с сосредоточенными параметрами применительно к рассматриваемой физической модели [3].

Уравнение сохранения вещества

$$D_1 - D = V \frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad (2.1)$$

Уравнение состояния



$$\rho = \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_{\theta_0} p + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \theta} \right)_{p_0} \theta, \quad (2.2)$$

где ρ — плотность; θ — температура рабочего тела; $(\partial \rho / \partial p)_{\theta_0}$ и $(\partial \rho / \partial \theta)_{p_0}$ — приращение плотности в зависимости от изменения давления при постоянной температуре, приращение плотности при изменении температуры при постоянном давлении (табличные значения).

Уравнение движения (зависимость между перепадом давления на сопротивлении 2 и расходом пара D_1)

$$p_1 - p = \xi \frac{D_1^2}{\rho}, \quad (2.3)$$

где ξ — приведенный коэффициент гидравлического сопротивления пароперегревателя (постоянная величина).

Уравнение клапана

$$p - p_2 = \xi_{кл} \frac{D^2}{\rho}, \quad (2.4)$$

где $\xi_{кл}$ — коэффициент сопротивления клапана (переменная величина, зависящая от степени открытия клапана). Начальные условия в исходной системе уравнений (2.1)–(2.4) задаются величинами стационарного режима или же берутся из теплового расчета при номинальных значениях D_{01} , D_0 , ξ_0 , p_{01} , p_{02} , θ_0 . Для перехода от системы уравнений (2.1)–(2.4), описывающих статику процесса, к уравнениям динамики запишем каждую переменную величину, входящую в (2.1)–(2.4), через ее постоянное значение в начальный момент времени и приращение: $x_i = x_{0i} + \Delta x_i$. Поскольку система в общем случае нелинейна, для рассмотрения ее в линейном приближении будем иметь в виду лишь малые значения приращения Δx_i . После преобразований исходной системы (2.1)–(2.4) с учетом записи ее переменных x_i в приращениях, т. е. описывающих нестационарный процесс, из нее вычитают эту же систему уравнений для стационарного (статического) режима при $x_i = x_{0i}$. В результате получим систему линейных уравнений, описывающих динамику приращений параметров x_i и y_i :

$$\Delta D_1 - \Delta D = V \frac{d\Delta \rho}{dt} \left(\text{при } \frac{\partial \rho_0}{\partial t} = 0 \right); \quad (2.5)$$

$$\Delta \rho = \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_{\theta_0} \Delta p + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \theta} \right)_{p_0} \Delta \theta; \quad (2.6)$$

$$\Delta p_1 - \Delta p = \frac{2\delta p_1}{D_0} \Delta D_1; \quad (2.7)$$

$$\Delta p - \Delta p_2 = \frac{2\delta p_2}{D_0} \Delta D + \frac{\delta p_2}{\xi_{0кл}} \Delta \xi_{кл} - \frac{\delta p_2}{\rho_0} \Delta \rho, \quad (2.8)$$

где $\delta p_1 = p_{01} - p_0$ — сопротивление пароперегревателя и паропровода в стационарном режиме; $\delta p_2 = p_0 - p_{02}$ — перепад давления на регулирующем клапане в стационарном режиме.

Следует заметить, что такая линеаризация не всегда допустима при рассмотрении режимов, изменяющихся в широком диапазоне, однако она вполне корректна при изучении работы автоматических систем стабилизации, обеспечивающих поддержание регулируемых

Рис. 2.2. Структурная схема парового тракта котла

величин y_i из уравнений (2.5)—(2.8) с высокой точностью вблизи заданных значений.

В систему уравнений (2.5)—(2.8) входит восемь переменных величин, из которых четыре (Δp_1 , Δp_2 , $\Delta \xi_{кл}$, $\Delta \theta$) служат независимыми возмущениями на входе рассматриваемой системы, а остальные четыре (Δp , ΔD_1 , ΔD , $\Delta \rho$) — их функциями и подлежат определению.

Для упрощения математических выкладок и уяснения сути аналитического расчета предположим, что в поставленной задаче искомым служит лишь уравнение динамики по каналу воздействия $p_1 \rightarrow p$. Таким образом, будем считать в (2.6)—(2.8) θ , p_2 и $\xi_{кл}$ постоянными величинами, а их приращения Δ_i — равными нулю.

Перепишем систему уравнений (2.5)—(2.8) для этого случая:

$$\Delta D_1 - \Delta D = V \frac{d\Delta p}{dt}; \quad (2.9)$$

$$\Delta p = \left(\frac{\partial p}{\partial p} \right)_{\theta_0} \Delta p_1; \quad (2.10)$$

$$\Delta p_1 - \Delta p = \frac{2\delta p_1}{D_0} \Delta D_1; \quad (2.11)$$

$$\Delta p = \frac{2\delta p_2}{D_0} \Delta D - \frac{\delta p_2}{\rho_0} \Delta \rho. \quad (2.12)$$

Сведем уравнения (2.9)—(2.12) в одно, подставив в уравнение (2.9) значения других зависимых переменных ΔD , ΔD_1 и $\Delta \rho$, выраженные из уравнений (2.10)—(2.12) через искомую переменную Δp и независимую величину Δp_1 :

$$\Delta p_1 \frac{D_0}{2\delta p_1} - \Delta p \frac{D_0}{2\delta p_2} - \Delta p_2 \frac{D_0}{2\rho_0} \left(\frac{\partial p}{\partial p} \right)_{\theta_0} = \frac{d\Delta p}{dt} V \left(\frac{\partial p}{\partial p} \right)_{\theta_0}. \quad (2.13)$$

Далее сгруппируем члены с Δp в левой части уравнения (2.13), а члены с независимой переменной Δp_1 — в правой и поделим обе части на коэффициент, стоящий перед искомой переменной Δp :

$$\begin{aligned} \Delta p + \frac{1}{\left(\frac{\delta p}{\delta p_1 \delta p_2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial p} \right)} \frac{2V\rho_0}{D_0 \rho_0} \frac{\partial p}{\partial p} \frac{d\Delta p}{dt} = \\ = \frac{D_0}{\delta p_1} \frac{1}{\left(\frac{1}{\delta p_2} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial p} \right) D_0} \Delta p_1. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} k &= \frac{1}{\frac{\delta p}{\delta p_1 \delta p_2} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial p}}; & k_{p1} &= \frac{k}{\delta p_1}; \\ T &= \frac{2G_0}{D_0} \frac{k}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial p}, \end{aligned} \quad (2.15)$$

где $\delta p = p^0_1 - p^0_2$, δp_1 , δp_2 , ρ_0 и D_0 равны их номинальным значениям, взятым для стационарного режима; $\partial p / \partial p$ определяется по табличным зависимостям для водяного пара [3]; $V_0 \rho_0 = G_0$ — масса пара в трубе.

Перепишем дифференциальное уравнение (2.14) с учетом принятых обозначений (2.15):

$$\Delta p(t) + T \frac{d\Delta p(t)}{dt} = k_{p1} \Delta p_1(t). \quad (2.16)$$

Его решением во временной области $\Delta p = f(t)$, так же как для уравнений (1.1) или (1.8), служит экспонента:

$$\Delta p = k_{p1} \Delta p_1 (1 - e^{-t/T}). \quad (2.17)$$

Для определения динамических характеристик рассматриваемого участка в виде передаточной функции или комплексной частотной характеристики применим к (2.16) преобразование Лапласа — Карсона (при нулевых начальных условиях и возмущающем воздействии Δp_1 в виде ступенчатой функции). Предварительно обозначим выходную величину участка Δp через $y = \Delta p / \rho_0$, входную — через $x_1 = \Delta p_1 / \rho_0$, а их изображения через $Y(p)$ и $X(p)$, тогда

$$Y(p) = (1 + Tp) = k_{p1} X_1(p), \quad (2.18)$$

где $p = d/dt$ — оператор Лапласа.

Из уравнения связи между изображениями выходной и входной величин можно получить передаточную функцию участка по каналу воздействия $p_1 \rightarrow p$ ($x_1 \rightarrow y$)

$$W(p) = \frac{k_{p1}}{1 + Tp} \quad (2.19)$$

и его комплексную частотную характеристику

$$W(i\omega) = \frac{k_{p1}}{1 + \omega^2 T^2} - i \frac{k_{p1} \omega T}{1 + \omega^2 T^2}. \quad (2.20)$$

2.3. СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ

Большинство тепловых объектов на электрических станциях — сложные динамические системы с распределенными параметрами. Аналитическое определение статических и динамических характеристик таких систем, например, в виде дифференциальных уравнений связано с большим объемом расчетных и исследовательских работ. Один из методов упрощения расчетов состоит в представлении сложного объекта с распределенными параметрами в виде последовательного или параллельного соединения участков с сосредоточенными параметрами. Последние должны обладать единством конструкции или однообразием протекающих в них физических и технологических процессов, а также сравнительной простотой математического описания. Рассмотрим, например, процесс изменения давления перегретого пара в трубопроводе на выходе парового котла, принципиальная технологическая схема которого изображена на рис. 2.3. Проследим прохождение сигнала по каналу топливо B_T — давление перегретого пара $p_{п.п}$.

Паровой котел как сложная динамическая система может быть разделен на ряд более простых участков (рис. 2.4).

Первый участок W_1 — транспортировка пылевидного топлива питателями пыли из бункеров пыли по пылепроводам к горелкам.

Динамические свойства этого участка позволяют приближенно считать его звеном транспортного запаздывания с передаточной функцией $W_1(p)e^{-p\tau}$, в которой значение τ зависит от скорости движения пылевоздушной смеси и дли-

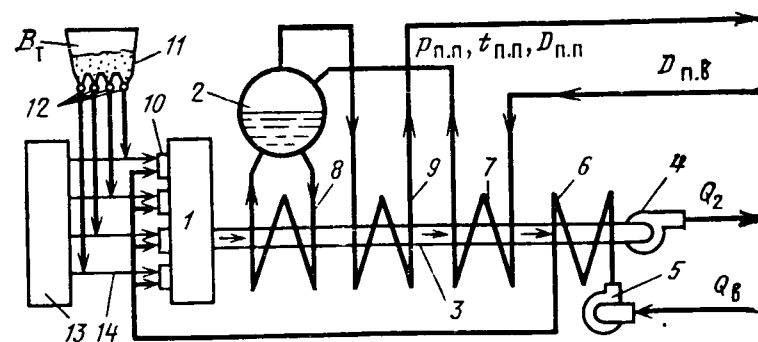


Рис. 2.3. Принципиальная технологическая схема котла:

1 — топка; 2 — барабан; 3 — газосход; 4 — дымосос; 5 — вентилятор; 6 — воздухоподогреватель; 7 — экономайзер; 8 — циркуляционный контур; 9 — пароперегреватель; 10 — горелки; 11 — бункер пыли; 12 — питатели пыли; 13 — короб первичного воздуха; 14 — пылепроводы

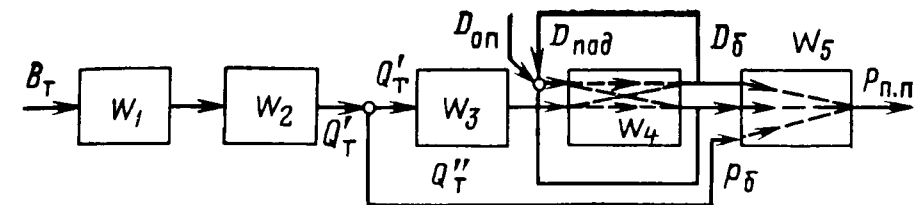


Рис. 2.4. Структурная схема парового котла по каналу воздействия $B_T - p_{п.п}$

ны пылепровода (на современных паровых котлах $\tau = 0,5 \div 2,5$ с).

Следующий участок W_2 — топочная камера. Здесь протекают процессы подачи топлива в топку, воспламенения и сгорания (полное или частичное).

Процесс тепловыделения, сопутствующий горению, приближенно описывается уравнением инерционного звена первого порядка с передаточной функцией $W_2(p) = \frac{k_2}{1 + T_2 p}$,

где значение T_2 колеблется от нескольких секунд до нескольких десятков секунд в зависимости от типа парового котла, вида топлива и других факторов. Тепловая энергия, выделившаяся при сгорании топлива, воспринимается радиационными и конвективными поверхностями нагрева парового котла. Следующий участок W_3 — процесс теплопередачи. Его динамика приближенно может быть описана уравнением инерционного звена первого (или более высокого) порядка с передаточной функцией

$$W_3(p) = \frac{k_3}{1 + T_3 p}.$$

Следующий участок W_4 образуют барабан, опускные трубы $D_{оп}$ циркуляционного контура, экранные поверхности (подъемные трубы $D_{под}$, где протекает процесс парообразования). Здесь осуществляются передача теплоты через стенки труб воде, нагревание ее до кипения, образование пара и перенос его из экранных труб в барабан. Физическая сущность процесса, протекающего в этом участке, поясняется структурной схемой на рис. 2.4 и заключается в том, что изменение подводимой к воде теплоты Q'_T приводит к изменению двух регулируемых величин — паропроизводительности D_6 и давления пара в барабане p_6 , которые в свою очередь оказывают воздействие на паропроизводительность подъемных труб $D_{под}$, т. е. служат и входными величинами. Таким образом, рассматриваемый участок нельзя считать звеном направленного действия, но, поскольку

ку он включен последовательно с предшествующими направленными звеньями — пылепроводами и топкой, направленность парового котла как системы в целом сохраняется. Это означает, что изменения D_6 и p_6 не окажут обратного воздействия на количество топлива B_T , подводимого в топку, и на Q_T и Q'_T . Если Q'_T изменится скачком, а расход пара D_6 поддерживается постоянным, например, с помощью регулирующих клапанов турбины или другого потребителя пара, то интересующая нас кривая переходного процесса по давлению пара в барабане p_6 будет иметь форму, близкую к экспоненте. Передаточная функция по каналу W_4 с учетом обратных связей по D_6 и p_6 приближенно может быть представлена в виде инерционного звена первого порядка $W_4 = k_4 / (1 + T_4 p)$.

Следующий участок W_5 составляют пароперегреватель и присоединенный к нему трубопровод перегретого пара, в котором происходит изменение интересующего нас давления. Рассматриваемый участок имеет три входа со стороны парового котла: D_6 , p_6 и Q'_T . Динамика этого участка по каналу $p_6 \rightarrow p_{п.п} (p_1 \rightarrow p)$ определена аналитически [формулы (2.16) и (2.19)]. Результирующая расчетная передаточная функция парового котла по каналу $B_T \rightarrow Q'_T \rightarrow p_6 \rightarrow p_{п.п}$ определяется перемножением передаточных функций последовательно включенных звеньев W_1 , W_2 , W_3 , W_4 и W_5 . Рассмотренный выше способ составления передаточной функции сложного объекта посредством соединения простых звеньев, передаточные функции которых известны или легко определяются, называется структурным моделированием. Составление дифференциальных уравнений и структурное моделирование предусматривают применение расчетных методов определения динамических свойств сложных объектов. Однако эти методы не всегда могут обеспечить достаточно точное воспроизведение фактической динамики объекта. Поэтому последняя часто определяется опытным путем. При этом возникает обратная задача: по известной экспериментальной временной характеристике требуется составить математическую модель объекта [1].

При описании динамических свойств тепловых объектов с помощью упрощенных математических моделей широкое распространение получили следующие соединения простых звеньев:

инерционное звено первого порядка последовательно соединено с запаздывающим звеном

$$W(p) = ke^{-p\tau} / (1 + pT); \quad (2.21)$$

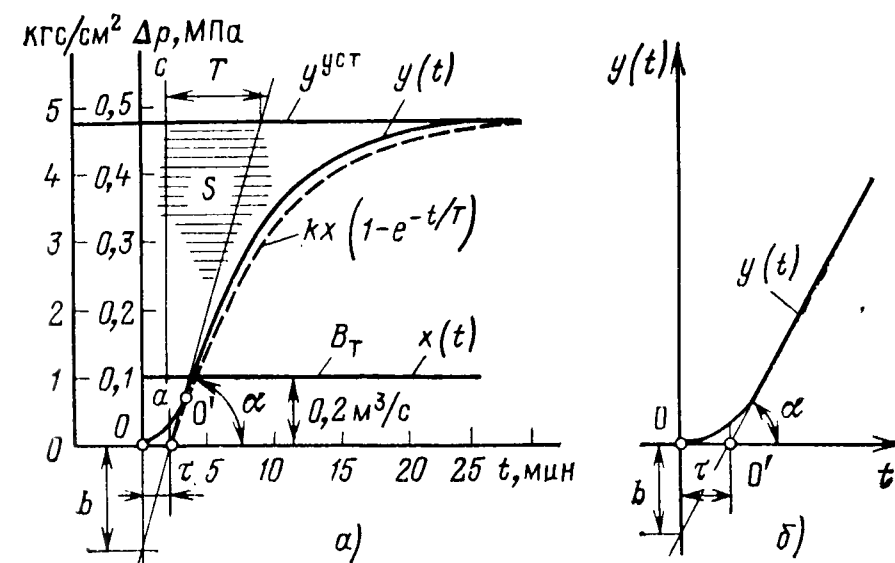


Рис. 2.5. Экспериментальные кривые разгона парогенератора ТП-87: а — по давлению перегретого пара при возмущении расходом топлива (газа); б — по уровню воды в барабане при возмущении расходом питательной воды

интегрирующее звено последовательно соединено с запаздывающим звеном

$$W(p) = k_n e^{-p\tau} / p. \quad (2.22)$$

При замене сложного объекта соединениями простых звеньев его динамические свойства могут быть описаны небольшим числом параметров. Рассмотрим способы такой замены на примере экспериментальной переходной кривой по давлению пара p_6 при возмущении топливом для барабанного парового котла, приведенной на рис. 2.5, а. Простейший способ состоит в том, что к кривой переходного процесса в точке ее перегиба (точка а на рис. 2.5, а) проводится касательная до пересечения с установившимся значением регулируемой величины и отрицательной полуосью ординат, как показано на рис. 2.5, а. Далее через точку O' пересечения касательной с осью абсцисс проводится прямая, параллельная оси ординат $O' C$.

Указанные построения позволяют определить длины отрезков b , τ и T . При этом линия $O' a$ одновременно служит касательной к экспоненте, сдвинутой вправо на отрезок τ от начала координат. Это означает, что исследуемый объект может быть представлен в виде последовательного соединения двух звеньев: запаздывающего звена со временем запаздывания τ и передаточной функцией $W_1(p) = e^{-p\tau}$

и инерционного звена первого порядка с коэффициентом усиления k , постоянной времени T и передаточной функцией

$$W_2(p) = \frac{k}{1 + pT}.$$

Результирующая передаточная функция имеет вид (2.21).

Реальная кривая переходного процесса $y(t)$ (сплошная линия) заменяется участком запаздывания τ и экспонентой $y(t) = kx(1 - e^{-t/T})$ (прерывистая линия). Динамические свойства объекта при такой замене характеризуют три величины:

1) коэффициент усиления или передачи $k = y_{уст}/x_1$. Обратная ей величина — степень самовыравнивания $\rho = x_1/y_{уст}$; в данном случае

$$k = \frac{\Delta p_{уст}}{\Delta B_T} = 24 \frac{\text{кгс/см}^2}{\text{м}^3/\text{с}};$$

$$\rho = 0,042 \frac{\text{м}^3/\text{с}}{[\text{кгс/см}^2]}.$$

Коэффициент ρ характеризует присущее многим теплоэнергетическим объектам свойство *самовыравнивания* или *саморегулирования*, т. е. способность объекта самостоятельно восстанавливать нарушенное равновесие между притоком и стоком энергии или вещества. При этом регулируемая величина после нанесения возмущения переходит к новому установившемуся значению. Однако в большинстве случаев это новое установившееся значение велико и установка автоматических регуляторов диктуется необходимостью снижения $y_{уст}$;

2) время запаздывания τ определяется отрезком, отсекаемым касательной $O'a$ на оси времени; считается условным запаздыванием, поскольку отклонение регулируемой величины начинается в реальных объектах гораздо раньше τ . В данном случае $\tau = 120$ с;

3) постоянная времени T , равная по значению подкасательной к экспоненте $(1 - e^{-t/T})$, определяется временем, за которое сигнал $y(t)$, нарастая с постоянной скоростью после приложения ступенчатого возмущения, достигнет нового установившегося состояния (за вычетом времени запаздывания). С другой стороны, T численно равна площади S , заключенной между кривой разгона и уровнем ее установившегося значения $y_{уст} = kx_1$ [см. формулу (1.24)], поделенной на это значение (за вычетом времени запаздывания τ).

В данном случае

$$T = \frac{S}{y_{уст}} - \tau = \frac{2570 \text{ с} \cdot \text{кгс/см}^2}{4,75 \text{ кгс/см}^2} - 120 \text{ с} = 400 \text{ с}.$$

Построение математической модели для объекта, не обладающего свойством самовыравнивания, выполняется в соответствии с рис. 2.5, б. В этом случае до пересечения с осью времени продолжается прямолинейный участок экспериментальной кривой $y(t)$. Передаточная функция объекта имеет вид

$$W(p) = \frac{k_n}{p} e^{-\rho\tau},$$

т. е. представляет собой последовательное соединение звена запаздывания и интересующего звена.

Динамические свойства указанных объектов характеризуются двумя величинами: запаздыванием τ и коэффициентом пропорциональности интегрирующего звена $k_n = \text{tga}/x_1 = b/x_1\tau$.

Контрольные вопросы

1. Назовите и поясните уравнения термодинамики для теплообменников (2.1), (2.2) и (2.3).
2. Как осуществляется линеаризация исходных уравнений?
3. Поясните вывод уравнений (2.14), (2.16) и (2.18).
4. Поясните структурную схему математической модели парового котла, изображенной на рис. 2.4.
5. Начертите типовые кривые переходных процессов для объекта, обладающего и не обладающего самовыравниванием.
6. Какие величины характеризуют динамические свойства типовых тепловых объектов? Как их определить по экспериментальной кривой разгона?

Глава третья

ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ И СПОСОБЫ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ В АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРАХ

3.1. ТИПОВЫЕ ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Понятие о законах регулирования. Р_п-закон. Предположим, что оператору требуется поддержать заданное значение регулируемой величины (например, уровня воды в барабане) при помощи измерительного прибора, показы-

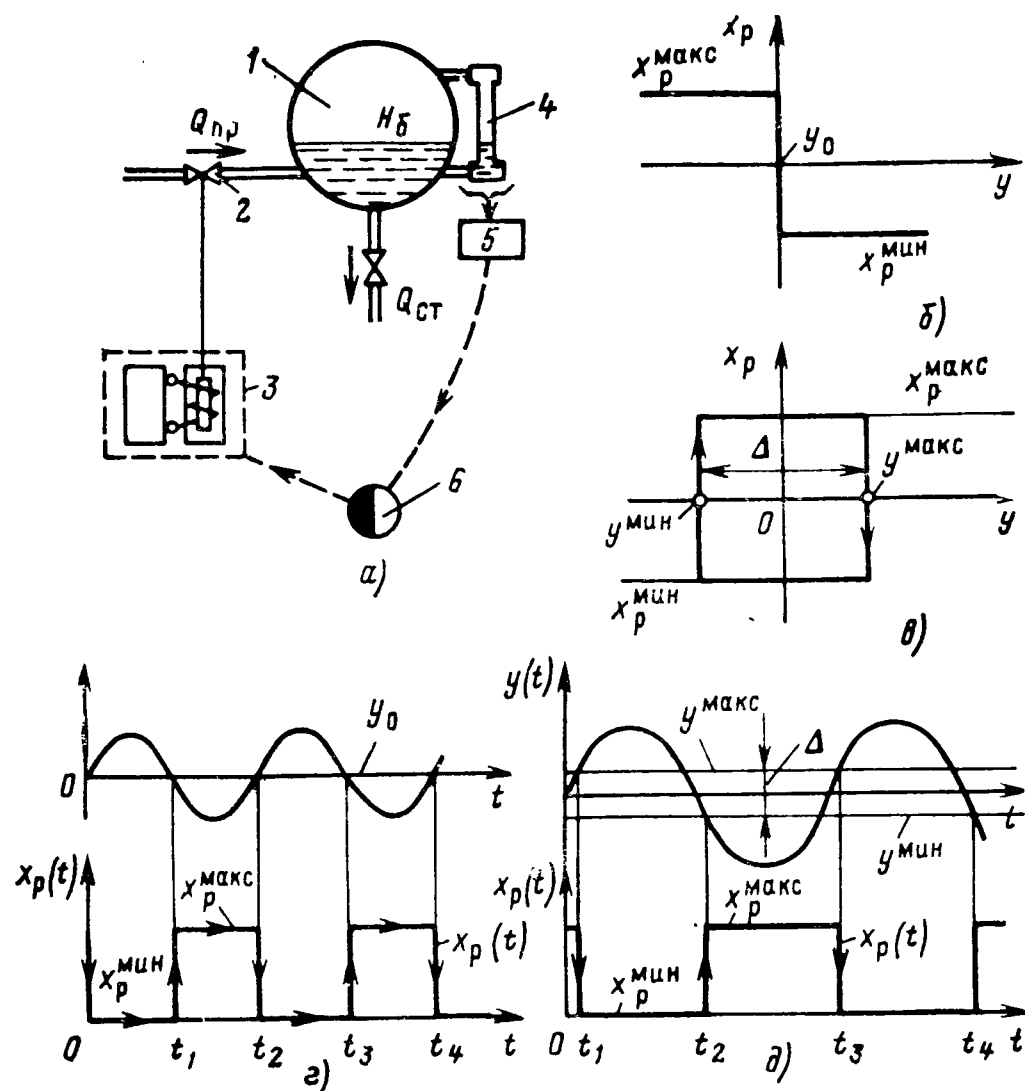


Рис. 3.1. Система регулирования уровня воды в баке с двухпозиционным регулирующим органом:

а — принципиальная схема системы регулирования: 1 — бак; 2 — регулирующий орган; 3 — электромагнитный сервопривод; 4 — водомерное стекло; 5 — прибор; 6 — оператор или автоматический регулятор; б, в — графики зависимости $x_p = f(y)$; г, д — процессы регулирования в системе с двухпозиционным регулятором; t_1-t_4 — точки переключения

вающего отклонения регулируемой величины от заданного значения, и сервопривода, скачком перемещающего регулирующий орган из одного крайнего положения («закрыто») в другое («открыто»).

Схема управления объектом для указанного случая изображена на рис. 3.1, а. При этом оператор перемещает регулирующий орган 2 из одного положения в другое в зависимости от изменения уровня: 1) при некотором определенном (небольшом) отклонении уровня воды — ΔH_δ в водомерном стекле 4 от заданного; 2) по достижении уровня

нём воды в баке верхнего $H_{\max_\delta}$ или нижнего допустимого предела $H_{\min_\delta}$.

Условимся называть в дальнейшем математическую зависимость между положением регулирующего органа x_p и отклонением регулируемой величины y законом регулирования

$$x_p = f(y). \quad (3.1)$$

В первом случае закон регулирования описывается двумя уравнениями:

$$x_p = \begin{cases} x_p^{\min} & \text{при } \infty > y \geq y_0; \\ x_p^{\max} & \text{при } y_0 > y \geq -\infty. \end{cases} \quad (3.2)$$

Графическим изображением уравнений (3.2) служит рис. 3.1, б.

Во втором случае (рис. 3.1, в) закон регулирования имеет вид:

$$x_p = \begin{cases} x_p^{\min} & \text{при } \infty > y \geq y_{\max}; \\ x_p^{\max} & \text{при } y_{\min} > y \geq -\infty. \end{cases} \quad (3.3)$$

На участке $y_{\max} \geq y \geq y_{\min}$ величина x_p имеет два значения $x_p^{\max}$ или $x_p^{\min}$ в зависимости от предшествующих значений y . Условия скачка при переходе с верхней ветки x_p на нижнюю записываются следующим образом:

$$x_p = x_p^{\min} \quad \text{при } y = y_{\max} \quad \text{и} \quad dy/dt < 0;$$

с нижней на верхнюю

$$x_p = x_p^{\max} \quad \text{при } y = y_{\min} \quad \text{и} \quad dy/dt > 0.$$

Такой способ регулирования называется *двухпозиционным* (по числу позиций, которые может занимать регулирующий орган). В обоих случаях форма процессов регулирования имеет колебательный характер. Работу оператора может выполнять измерительный прибор, снабженный контактным устройством, управляющим перемещением электромагнитного сервопривода (3 на рис. 3.1) в нужном направлении. Графики движения $x_p(t) = f[y(t)]$ для этих случаев приведены на рис. 3.1, г, д.

Закон регулирования, осуществляемый рассмотренным регулятором, описывается нелинейной (релейной) статиче-

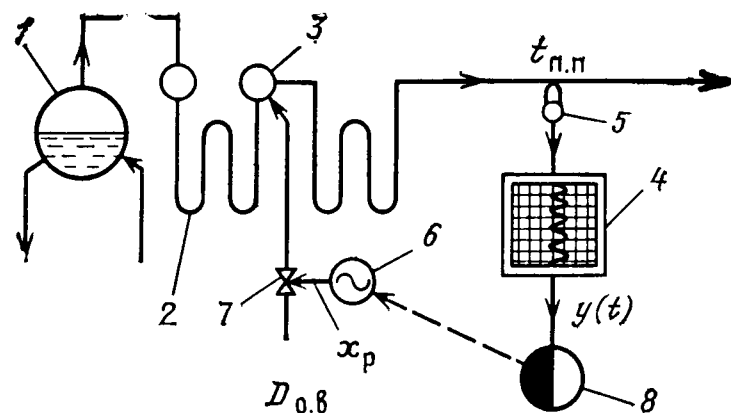


Рис. 3.2. Система регулирования $t_{п.п.}$ с регулирующим клапаном, управляемым сервоприводом с переменной скоростью движения:

1 — барабан; 2 — пароперегреватель; 3 — коллектор впрыска охлаждающей воды; 4 — прибор, записывающий $t_{п.п.}$; 5 — датчик; 6 — сервопривод с регулируемой частотой вращения выходного вала; 7 — клапан, регулирующий расход охлаждающей воды; 8 — оператор или автоматический регулятор

ской характеристикой (3.2) или (3.3). Соответственно регулятор называется *релейным позиционным*, а закон регулирования P_n -законом.

Промышленные двухпозиционные регуляторы чаще всего выполняются на базе измерительных приборов (стрелочных или самопишущих), снабженных контактным устройством и регулирующей приставкой (усилителем мощности входного сигнала), управляющей электромагнитным сервоприводом регулирующего органа.

П- и И-законы. Проанализируем работу оператора при дистанционном регулировании температуры перегретого пара барабанного котла (рис. 3.2). В распоряжении оператора имеются автоматический показывающий и самопишущий потенциометр и регулирующий клапан на подводе охлаждающей воды к пароохладителю, управляемый дистанционно с помощью сервопривода. В случае отклонения $t_{п.п.}$ пара от заданного значения оператор увеличивает или уменьшает расход охлаждающей воды $G_{0.в}$ через пароохладитель посредством перемещения регулирующего клапана. При этом изменять положение клапана и расход $G_{0.в}$ можно различными способами. Например, перемещение клапана можно осуществлять пропорционально *отклонению* регулируемой величины. В этом случае связь между x_p и y (закон регулирования) можно выразить уравнением

$$x_p(t) = k_p y(t), \quad (3.4)$$

где k_p — коэффициент пропорциональности.

Если в распоряжении оператора имеется сервопривод с регулируемой скоростью перемещения, то он может пере-

мещать клапан со скоростью, пропорциональной скорости отклонения регулируемой величины $y(t)$, о которой он может судить по наклону касательной к кривой записи $t_{п.п.}$. При этом закон регулирования выразится уравнением

$$\frac{dx_p(t)}{dt} = K_p \frac{dy(t)}{dt}. \quad (3.5)$$

Выражения (3.4) и (3.5) соответствуют *пропорциональному* закону регулирования, или сокращенно *П-закону*. В этом случае каждому установившемуся значению регулируемой величины соответствует определенное положение регулирующего органа. Пример промышленного автоматического регулятора (поплавковый регулятор уровня), реализующего принцип регулирования по отклонению или P_n -закон регулирования, приведен на рис. В.1.

Для замкнутой АСР, состоящей из объекта и P_n -регулятора, характерно наличие остаточного отклонения регулируемой величины по окончании процесса регулирования.

Регулирование можно осуществлять и другим способом. Например, так, чтобы скорость перемещения клапана была пропорциональна отклонению $y(t)$:

$$\frac{dx_p(t)}{dt} = k_n y(t), \quad (3.6)$$

где k_n — коэффициент пропорциональности или передачи, имеющий размерность скорости.

Проинтегрировав обе части (3.6), получим

$$x_p(t) = k_n \int_0^t y(t) dt. \quad (3.7)$$

Последнее уравнение аналогично уравнению интегрирующего звена (1.61). Его решение имеет вид

$$x_p(t) = k_n t,$$

где $k_n = \text{tg} \alpha / y$ характеризует скорость нарастания сигнала на выходе регулятора x_p после нанесения ступенчатого возмущения на входе $y(t) = y$ (см. рис. 1.30, а).

Уравнение (3.7) или указанный способ перестановки клапана характеризует *интегральный закон регулирования*, или *И-закон*.

Другая форма записи интегрального закона имеет вид

$$x_p(t) = \frac{K_p}{T_n} \int_0^t y(t) dt, \quad (3.8)$$

где K_p — условный коэффициент передачи интегрального регулятора; $T_{\text{и}}$ — условная постоянная времени интегрирования.

Пример автоматического регулятора давления, реализующего И-закон регулирования, приведен на рис. 1.1.

Для замкнутой одноконтурной АСР, состоящей из объекта и И-регулятора, характерно отсутствие остаточного отклонения регулируемой величины по окончании процесса регулирования (см. рис. 1.6, а, б).

ПИ- и ПД-законы. Вернемся к системе регулирования температуры перегрева пара, изображенной на рис. 3.2. Если перемещать клапан, руководствуясь только скоростью отклонения регулируемой величины, можно нарушить соответствие между требуемым количеством охлаждающей воды и отклонением, а если учитывать только отклонение $t_{\text{п.п}}$, можно запоздать с подачей требуемого количества воды. Поэтому, исходя из требований соответствия $t_{\text{п.п}}$ и $G_{\text{о.в}}$ при перестановке клапана в каждый момент времени, целесообразно руководствоваться не только отклонением или скоростью отклонения регулируемой величины, а учитывать оба эти фактора одновременно. При этом возможны два способа: 1) перемещать регулирующий орган со скоростью, пропорциональной отклонению и скорости отклонения $y(t)$; 2) переставлять регулирующий орган в *положение*, пропорциональное *отклонению и скорости отклонения* $y(t)$.

В обоих случаях оператор руководствуется не только отклонением температуры, но и направлением ее изменения по кривой записи на приборе.

Первый способ перестановки клапана описывается уравнением

$$\frac{dx_p(t)}{dt} = K_p \frac{dy(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_{\text{и}}} y(t). \quad (3.9)$$

Проинтегрировав правую и левую части уравнения (3.9), получим

$$x_p(t) = K_p y(t) + \frac{K_p}{T_{\text{и}}} \int_0^t y(t) dt. \quad (3.10)$$

Такой закон регулирования в соответствии с наименованием составляющих правой части (3.10) носит название *пропорционально-интегрального*, или ПИ-закона.

В замкнутой одноконтурной АСР, состоящей из объекта и ПИ-регулятора, отсутствует остаточное отклонение ре-

гулируемой величины. В то же время при установившемся значении регулируемой величины регулирующий орган может занимать различные положения. Решение уравнения (3.9) имеет вид (3.10).

Из графика решения $x_p(t)$, изображенного на рис. 3.3, становится ясной правомерность замены коэффициента пропорциональности интегрирующего звена в уравнениях (3.6) и (3.7) $K_{\text{и}}$ на численно равное ему отношение $K_p/T_{\text{и}}$.

Действительно,

$$K_{\text{и}} = \frac{\text{tg } \alpha}{y} = \frac{K_p y}{T_{\text{и}} y}, \quad \text{или} \quad K_{\text{и}} = K_p/T_{\text{и}}.$$

При втором способе перемещения регулирующего органа связь между x_p и y выражается

$$x_p(t) = K_p y(t) + K_d T_d \frac{dy(t)}{dt}, \quad (3.11)$$

где K_d и T_d — коэффициент и постоянная времени дифференцирующей составляющей. Они имеют тот же геометрический и физический смысл, что и K_d и T_d для реального дифференцирующего звена [формула (1.77), рис. 1.37]. Закон регулирования в соответствии с наименованием составляющих правой части (3.11) называется *пропорционально-дифференциальным*, или ПД-законом.

Замкнутой АСР с ПД-регулятором свойственно остаточное отклонение регулируемой величины.

ПИД-закон. Более точного поддержания регулируемой величины можно достичь, если скорость перемещения клапана (см. рис. 3.2) сделать зависимой не только от отклонения регулируемой величины и ее производной, но также и от второй производной $d^2y(t)/dt^2$, учитывающей ускорение (замедление) роста (падения) температуры. Перемещение регулирующего органа в этом случае описывается более сложным уравнением

$$\frac{dx_p(t)}{dt} = K_p \frac{dy(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_{\text{и}}} y(t) + K_d T_d \frac{d^2y(t)}{dt^2} \quad (3.12)$$

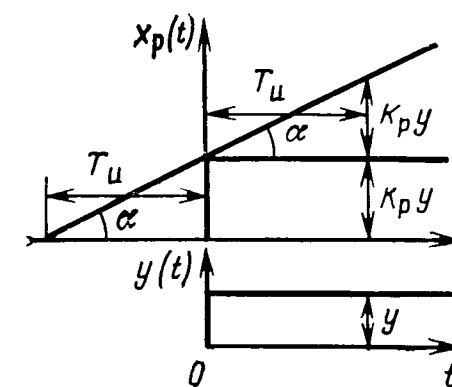


Рис. 3.3. График $x_p(t)$ для ПИ-закона

$$x_p(t) = K_p y(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t y(t) dt + K_d T_d \frac{dy(t)}{dt}. \quad (3.12a)$$

Перемещение регулирующего органа в соответствии с (3.12) и (3.12a) называется *пропорционально-интегрально-дифференциальным* законом регулирования (ПИД-законом).

В замкнутой АСР с ПИД-регулятором отсутствует остаточное отклонение y и обеспечивается большее быстродействие при перемещении регулирующего органа по сравнению с ПИ-законом.

Автоматические регуляторы различной конструкции имеют единую классификацию по виду реализуемых ими законов регулирования. В соответствии с уравнениями (3.2) — (3.12a) существуют следующие типы регуляторов: релейный позиционный — Р-регулятор (3.2) и (3.3); пропорциональный — П-регулятор (3.4) и (3.5); интегральный — И-регулятор (3.6) и (3.7); пропорционально-интегральный — ПИ-регулятор (3.9) и (3.10); пропорционально-дифференциальный — ПД-регулятор (3.11); пропорционально-интегрально-дифференциальный — ПИД-регулятор (3.12), (3.12a). Динамические характеристики П- и И-регуляторов могут быть выражены с помощью динамических характеристик (временных и частотных) соответствующих типовых звеньев. Математические модели или структурные схемы ПД-, ПИ- и ПИД-регуляторов могут быть изображены в виде параллельных соединений пропорционального, интегрального и дифференцирующего звеньев в зависимости от вида закона регулирования. Динамические характеристики регуляторов представлены в табл. 3.1.

3.2. ФОРМИРОВАНИЕ ЗАКОНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ В АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРАХ

Требования к автоматическим регуляторам. Автоматические регуляторы, действующие на ТЭС, помимо высокой надежности, должны обладать высокой чувствительностью к изменениям входного сигнала, необходимой для точного поддержания регулируемых величин вблизи заданного значения. Для этого в составе регулятора предусматривается специальное измерительное устройство. Кроме того, автоматический регулятор должен развивать на выходе усилие, необходимое для перемещения регулирующих органов (кла-

Таблица 3.1. Динамические характеристики регуляторов

Тип регулятора	Структурная схема	Оператор $W(p)$	Временная характеристика	АФХ $W(i\omega)$
П-пропорциональный $x_p = K_p y$		K_p		
И-интегральный $x_p = \frac{K_p}{T_i} \int y$		$\frac{K_p}{T_i p}$		
ПД-пропорционально-дифференциальный $x_p = K_p y + K_d T_d y'$		$K_p + K_d T_d p$		
ПИ-пропорционально-интегральный $x_p = K_p y + \frac{K_p}{T_i} \int y$		$K_p + \frac{K_p}{T_i p}$		
ПИД-пропорционально-интегрально-дифференциальный $x_p = K_p y + \frac{K_p}{T_i} \int y + K_d T_d y'$		$K_p + \frac{K_p}{T_i p} + K_d T_d p$		

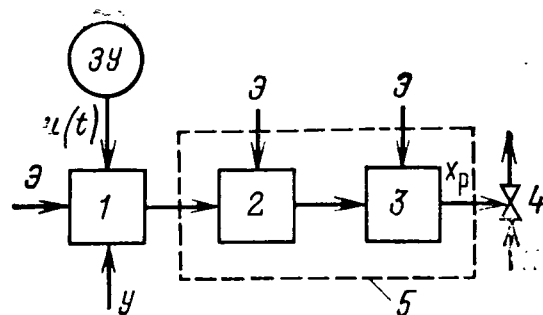


Рис. 3.4. Функциональная схема автоматического регулятора непрямого действия:

1 — измерительное устройство; 2 — командно-усилительное устройство; 3 — сервопривод; 4 — регулируемый орган; 5 — собственно регулятор; ЗУ — источник внешней энергии; ЗУ — задатчик управления

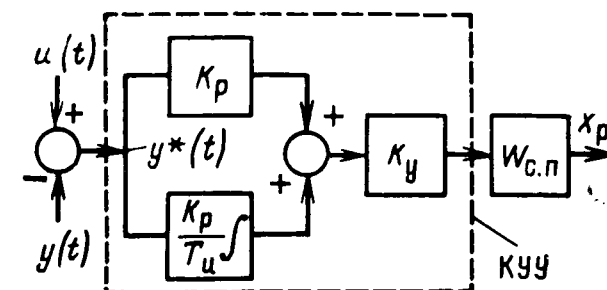
панов, задвижек, шиберов), т. е. содержать в своей структуре достаточно мощный исполнительный механизм (сервопривод).

Для реализации выбранного закона регулирования и изменения параметров настройки регулятора в необходимых пределах в его состав должны входить устройства формирования закона регулирования и изменения (коррекции) параметров настройки. Необходимо также иметь возможность изменения в широких пределах заданного значения регулируемой величины $u(t)$, с которым сравнивается ее текущее значение $y(t)$. Это требование предусматривает наличие задатчика ручного или автоматического управления (ЗУ) в составе регулятора. Выполнение перечисленных требований возможно лишь при использовании автоматических регуляторов непрямого действия с функциональной схемой, изображенной на рис. 3.4.

Формирование законов регулирования корректирующими устройствами и сервоприводом

Наиболее распространенные сервоприводы, входящие в состав автоматических регуляторов, обладают характеристиками интегрального или пропорционального звена. Если сервопривод имеет линейную статическую характеристику, т. е. является пропорциональным звеном, на его базе может быть осуществлен любой линейный закон регулирования путем последовательного подключения к нему командно-усилительного устройства (КУУ), корректирующего настройку выбранного типа регулятора (метод последовательной коррекции). Например, ПИ-регулятор может быть

Рис. 3.5. Структурная схема ПИ-регулятора с последовательной коррекцией параметров настройки



реализован в соответствии со структурной схемой, изображенной на рис. 3.5.

На базе сервопривода, обладающего характеристиками интегрального звена, методом последовательной коррекции реализуется лишь интегральный закон регулирования в соответствии с функциональной схемой, изображенной на рис. 3.4. В отличие от регулятора с пропорциональным сервоприводом интегральный сервопривод участвует в формировании закона регулирования

$$W_p(p) = \frac{X_p(p)}{Y^*(p)} = W_{куу}(p) W_{сп}(p) = K_y \frac{K_{и}}{p}. \quad (3.13)$$

Для формирования законов, отличных от интегрального в регуляторах, имеющих в своем составе интегральный сервопривод, требуются иные методы коррекции входного сигнала. Придать необходимые динамические свойства цепи, состоящей из КУУ и сервопривода, можно при помощи обратных связей методом параллельной коррекции, являющейся разновидностью встречно-параллельных соединений звеньев, рассмотренных выше (см. § 1.6). В качестве примера рассмотрим регулятор, состоящий из усилителя с коэффициентом усиления K_y , сервопривода и звена отрицательной обратной связи (корректирующего устройства) с характеристикой $W_{о.с}(p)$ (рис. 3.6). В соответствии с правилом определения передаточной функции встречно-параллельных звеньев

$$\frac{X_p}{Y^*}(p) = W_p(p) = \frac{K_y W_{сп}(p)}{1 + K_y W_{о.с}(p) W_{сп}(p)}, \quad (3.14)$$

где $W_{сп}(p)$ — передаточная характеристика сервопривода.

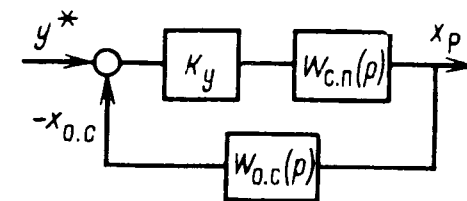


Рис. 3.6. Структурная схема регулятора, состоящего из усилителя, сервопривода и отрицательной обратной связи

При $K_y \gg 1$, что обычно имеет место в автоматических регуляторах, в уравнении (3.14) можно пренебречь единицей в знаменателе, тогда

$$W_p(p) \approx \frac{K_y W_{сп}(p)}{K_y W_{о.с}(p) W_{сп}(p)} = \frac{1}{W_{о.с}(p)}. \quad (3.15)$$

Итак, при использовании обратной связи и большом коэффициенте усиления в прямом канале ($K_y \gg 1$) динамические характеристики регулятора целиком определяются динамикой устройства обратной связи. Это важнейшее свойство систем с обратной связью широко используется при конструировании автоматических регуляторов, которые должны, во-первых, значительно усиливать входной сигнал по мощности и, во-вторых, по возможности точно воспроизводить выбранный закон регулирования при изменении в широких пределах параметров настройки (коэффициентов K_p , T_n , K_d и T_d в уравнениях П-, ПИ- и ПИД-законов).

Первое условие выполняется в прямом канале *усилительным устройством — сервоприводом*, второе — в мало-мощных корректирующих цепях обратной связи, осуществляемых, например, на пассивных РС-элементах в электрических системах или же на их аналогах в гидравлических и пневматических системах. При этом динамика регулятора в целом будет определяться динамикой корректирующего устройства (цепи обратной связи).

3.3. СТРУКТУРЫ ТИПОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

Рассмотрим структурные схемы автоматических регуляторов с типовыми сервоприводами, воспроизводящие основные законы регулирования методом параллельной и последовательной коррекции.

П-регулятор. Функциональная схема П-регулятора с сервоприводом с пропорциональной или интегральной скоростью перемещения изображена на рис. 3.6.

Отрицательная обратная связь в регуляторе осуществляется по положению регулирующего органа путем подачи на вход устройства обратной связи сигнала с выхода сервопривода. Конструктивно обратная связь осуществляется с помощью механической, электрической или другой передачи в зависимости от типов сервопривода и КУУ. Характеристики П-регуляторов (операторная и частотная) имеют вид:

$$W_p(p) = 1/W_{о.с}(p); \quad W_p(i\omega) = 1/W_{о.с}(i\omega). \quad (3.16)$$

Для того чтобы (3.16) было тождественно уравнению пропорционального регулятора $x_p = K_p y^*$, необходимо выполнить условие

$$W_{о.с}(p) = X_{о.с}(p)/x_p(p) = 1/K_p. \quad (3.17)$$

В соответствии с (3.17) обратная связь должна выполняться на базе безынерционного усилительного звена. Коэффициент усиления звена обратной связи $k_{о.с} = \delta = \frac{1}{K_p}$ называют степенью жесткой (т. е. неизменной во времени) *обратной связи* [1].

П-регуляторы имеют орган настройки для изменения $\delta(K_p)$, который служит параметром его настройки. Переходная характеристика реального П-регулятора (рис. 3.7) несколько отличается от идеального в начальной своей части из-за ограниченной скорости сервопривода.

ПД-регулятор. Функциональная схема ПД-регулятора представлена на рис. 3.8, а. Дифференцирующая составляющая формируется специальным прибором — дифференциатором, обладающим характеристикой реального дифференцирующего звена. На его выходе формируется сигнал, пропорциональный скорости изменения регулируемой величины. Скоростной сигнал суммиру-

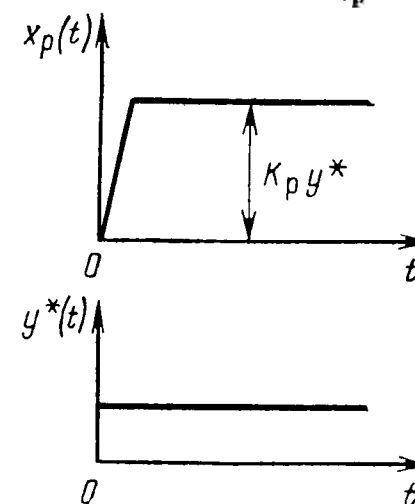


Рис. 3.7. Кривая переходного процесса П-регулятора

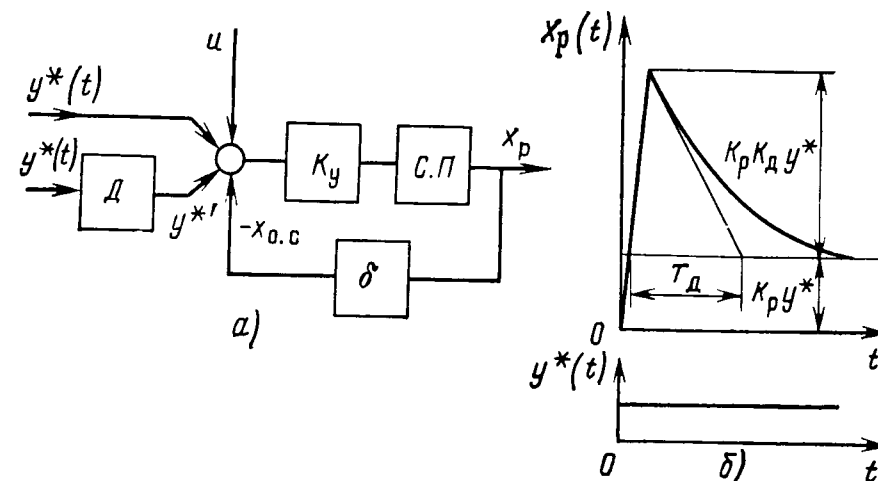


Рис. 3.8. ПД-регулятор:

а — структурная схема; б — кривая переходного процесса

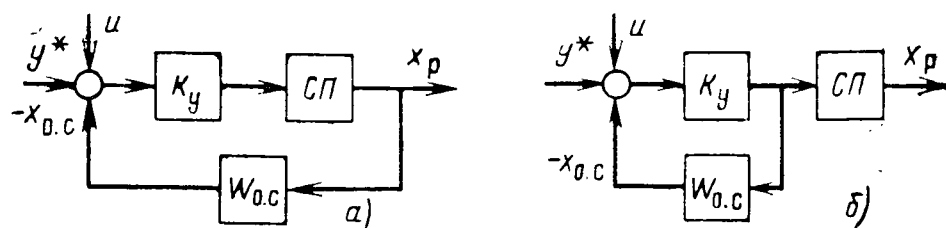


Рис. 3.9. Структурные схемы ПИ-регуляторов:
а — сервопривод охвачен ООС; б — сервопривод не охвачен ООС

ется с сигналом по отклонению регулируемой величины. Результирующий сигнал поступает на вход усилителя. Усилитель и сервопривод охватываются жесткой отрицательной обратной связью. В замкнутом контуре *усили- тель — привод — обратная связь* формируется П-закон регулирования с коэффициентом усиления K_p . Динамическая характеристика реального ПД-регулятора имеет вид

$$x_p(t) = K_p \left(1 + \frac{K_d T_d p}{1 + T_d p} \right). \quad (3.18)$$

Переходная (временная) характеристика ПД-регулятора с сервоприводом с ограниченной скоростью изображена на рис. 3.8, б и представляет собой сумму временных характеристик пропорционального и реального дифференцирующего звеньев. Параметром настройки собственно регулятора служит K_p (степень обратной связи δ); параметрами настройки дифференциатора служат коэффициент усиления K_d и постоянная дифференцирования T_d , произведение которых характеризует степень ввода дифференциальной составляющей в ПД-закон регулирования.

ПИ-регулятор. Реальные ПИ-регуляторы тепловых процессов имеют два вида функциональных схем (рис. 3.9). В первом варианте (рис. 3.9, а) сервопривод охватывается отрицательной обратной связью (ООС) и его характеристика не влияет на формирование закона регулирования, целиком определяемого характеристикой устройства обратной связи. Во втором варианте (рис. 3.9, б) сервопривод не охватывается обратной связью и ПИ-закон регулирования формируется охватом обратной связью только усилителя K_y . При этом динамические характеристики регулятора в целом определяются динамическими свойствами цепи, состоящей из последовательно включенных замкнутого контура ($K_y - W_{0.c}$) и сервопривода. Оба варианта структурных схем ПИ-регуляторов используются в их промышленных исполнениях.

В первом варианте устройство обратной связи должно иметь динамическую характеристику реального дифференцирующего звена (1.77)

$$W_{0.c}(p) = \frac{K_d T_d p}{1 + T_d p}.$$

В этом случае регулятор в целом независимо от типа сервопривода воспроизводит динамику ПИ-регулятора

$$W(p) = \frac{1}{W_{0.c}(p)} = \frac{1 + T_d p}{K_d T_d p} = \frac{1}{K_d} + \frac{1}{K_d T_d p}. \quad (3.19)$$

Если принять $T_d = T_n$ и $K_p = 1/K_d$, получим

$$W_p(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_n p} \right), \quad (3.20)$$

т. е. передаточную функцию ПИ-регулятора, описываемого также дифференциальными уравнениями (3.9), (3.10). В промышленных ПИ-регуляторах в качестве обратных связей используют различные устройства: электрические, пневматические и гидравлические. Но все они служат аналогами реального дифференцирующего звена (см. рис. 1.36), имеют соответствующие ему динамические характеристики и называются устройствами *гибкой* или *упругой* (изменяющейся во времени) обратной связи.

При втором варианте исполнения ПИ-регулятора (рис. 3.9, б) возможны два случая: 1) сервопривод имеет характеристику интегрального звена (например, электрический или гидравлический сервопривод с переменной скоростью); 2) сервопривод обладает характеристикой пропорционального звена (мембранный сервопривод с уравновешивающей пружиной). В обоих случаях в соответствии с правилом определения результирующей характеристики двух последовательно включенных звеньев

$$W_p(p) = W_{куу}(p) W_{с.п}(p), \quad (3.21)$$

где

$$W_{куу}(p) = 1/W_{0.c}(p).$$

При использовании сервопривода с передаточной функцией интегрального звена $W_{с.п}(p) = 1/T_p$ передаточная функция регулятора имеет вид

$$W_p(p) = W_{куу}(p) \frac{1}{T_p}. \quad (3.22)$$

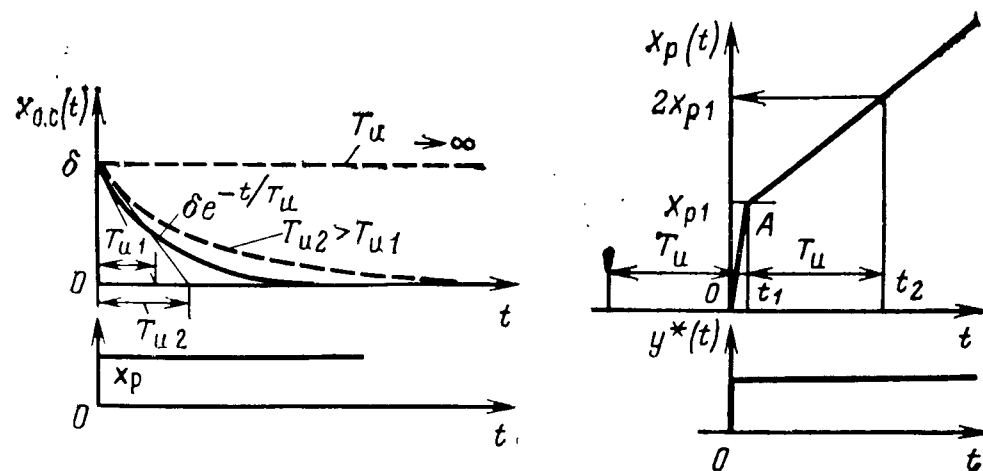


Рис. 3.10. Переходный процесс в устройстве обратной связи

Рис. 3.11. Переходный процесс ПИ-регулятора

При этом для формирования ПИ-закона с помощью устройства обратной связи необходимо, чтобы выдерживалось соотношение

$$1/W_{o.c}(p) = W_{кuy}(p) = K_p(1 + T_p), \quad (3.23)$$

что обеспечивает обратная связь с оператором

$$W_{o.c}(p) = K_{o.c}/(1 + T_p) = \delta/(1 + T_p). \quad (3.24)$$

Последнее уравнение служит оператором инерционного звена первого порядка. При охвате K_y такой обратной связью оператор регулятора в целом имеет вид (3.20)

$$W_p(p) = K_p(1 + 1/T_{и}p).$$

Параметрами настройки ПИ-регулятора служат K_p и $T_{и}$.

Если сервопривод имеет характеристику пропорционального звена и не охватывается обратной связью (рис. 3.9, б), то для того, чтобы выполнялось условие (3.20), $W_{o.c}(p)$ должно быть реальным дифференцирующим звеном (1.77).

Постоянная времени ПИ-регулятора $T_{и}$ численно равна подкасательной T_d к переходной кривой реального дифференцирующего звена (рис. 3.10).

Промышленные регуляторы имеют специальные приспособления — органы настройки для изменения $K_p(\delta)$ и $T_{и}$ в достаточно широких, но ограниченных пределах. Так как подача на вход регулятора ступенчатого сигнала не составляет труда, фактически установленные значения K_p и $T_{и}$ можно легко определить из его экспериментальной пере-

ходной кривой (рис. 3.11). Наклонный участок ОА на кривой объясняется наличием у промышленного ПИ-регулятора сервопривода с конечной (ограниченной) скоростью перемещения выходного вала редуктора. Из этого графика следует, что

$$K_p = x_{p1}/y^*, \quad (3.25)$$

а $T_{и}$ численно равно времени, необходимому для перемещения выходного вала сервопривода из положения x_{p1} до его удвоенного значения $2x_{p1}$. Отсюда второе название $T_{и}$ — *время удвоения* выходного сигнала ПИ-регулятора x_p при подаче на его вход ступенчатого сигнала y^* .

Из уравнения динамики идеального ПИ-регулятора следует, что $K_p/T_{и}$ определяет степень ввода интегральной составляющей в ПИ-закон регулирования

$$x_p(t) = K_p y^*(t) + \frac{K_p}{T_{и}} \int_0^t y^*(t) dt.$$

Действительно, при безграничном увеличении $T_{и}$ второй член в последнем уравнении $\frac{K_p}{T_{и}} \int_0^t y^*(t) dt$ стремится к нулю

и регулятор из пропорционально-интегрального переходит в П-регулятор. При этом экспонента (вида $\delta e^{-t/T_{и}}$) на выходе реального дифференцирующего звена, используемого в качестве устройства обратной связи, вырождается в ступенчатый сигнал δ (см. рис. 3.10).

ПИД-регулятор. Закон регулирования

$$W_p(p) = K_p + K_p/T_{и}p + K_d T_d p \quad (3.26)$$

в реальных регуляторах формируется путем последовательной (рис. 3.12, а) или параллельной (рис. 3.12, б) коррекций ПИ-регулятора с помощью реального дифференцирующего (РД) звена. В обоих случаях ПИД-закон воспроизводится лишь приближенно. При последовательной коррекции

$$\begin{aligned} W_{пид}^*(p) &= \left[\frac{K_d T_d p}{(1 + T_d p)} + 1 \right] \frac{K_p}{T_{и} p} (1 + T_{и} p) = \\ &= \frac{1}{1 + T_d p} \left(K_p^* + \frac{K_p}{T_{и} p} + K_p T_d^* p \right), \end{aligned} \quad (3.27)$$

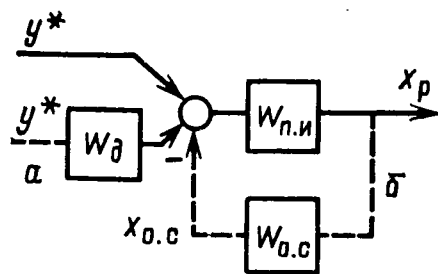


Рис. 3.12. Последовательная (а) и параллельная (б) коррекция ПИ-регулятора с помощью дифференцирующего звена

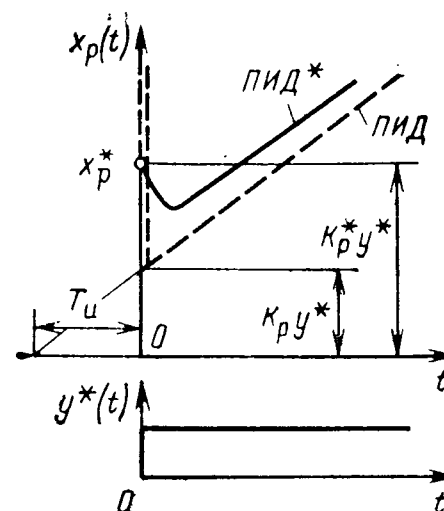


Рис. 3.13. Переходные характеристики ПИД-регуляторов

где

$$K_p^* = K_p \left[1 + \frac{T_d}{T_i} (1 + K_d) \right]; \quad T_d^* = T_d (1 + K_d).$$

При параллельной коррекции

$$\begin{aligned} W_{\text{пид}}^*(p) &= \frac{K_p (1 + T_i p)}{T_i p \left[1 + \frac{K_d T_d p}{1 + T_d p} \frac{K_p}{T_i p} (1 + T_i p) \right]} = \\ &= \frac{1}{1 + T^* p} \left[K_p^* \left(1 + \frac{T_d}{T_i} \right) + \frac{K_p^*}{T_i p} + K_p^* T_d p \right], \end{aligned} \quad (3.28)$$

где

$$K_p^* = \frac{K_p}{\left(1 + K_p K_d \frac{T_d}{T_i} \right)}; \quad T^* = T_d \frac{1 + K_p K_d}{1 + K_p K_d \frac{T_d}{T_i}}.$$

ПИД-регулятор имеет четыре параметра настройки: K_p , T_i , T_d и K_d , которые могут быть получены из экспериментальных кривых разгона ПИ-регулятора и РД-звена, снятых по отдельности. Комплексные параметры настройки реального ПИД-регулятора K_p^* и T^* можно определить по формулам (3.27) и (3.28).

На рис. 3.13 приведена кривая разгона реального ПИД-регулятора с аналоговым выходом (сплошная линия). В отличие от идеального (прерывистая линия) она имеет огра-

ниченный и плавно затухающий «всплеск» x_p^* , связанный с дифференцированием ступенчатого сигнала с помощью РД-звена.

Контрольные вопросы

1. Что называется законом регулирования? Приведите пример.
2. Напишите дифференциальное уравнение ПИ-регулятора. Назовите параметры его настройки.
3. Начертите структурную схему идеального ПИ-регулятора.
4. Начертите переходные характеристики П-, И- и ПИ-регуляторов.
5. Как реализуются линейные законы регулирования методом последовательной коррекции?
6. В чем сущность реализации линейных законов регулирования с помощью обратных связей?
7. Нарисуйте структурную схему ПИ-регулятора с сервоприводом, охваченным обратной связью. Какой вид имеет передаточная функция устройства обратной связи для этого случая?
8. Нарисуйте структурную схему ПИ-регулятора с сервоприводом, обладающим характеристиками интегрального звена, последовательно включенным с командно-усилительным устройством. Какой вид имеет передаточная функция устройства обратной связи, охватывающего линейный усилитель для этого случая?
9. Напишите дифференциальное уравнение ПИД-регулятора и назовите параметры его настройки.

Глава четвертая

УСТОЙЧИВОСТЬ И КАЧЕСТВО ПРОЦЕССОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

4.1. ПРОЦЕССЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА ИХ УСТОЙЧИВОСТИ

Процессом автоматического регулирования называется переходный процесс в замкнутой АСР (см. § 1.3). Он характеризуется переходом во времени регулируемой величины из одного установившегося состояния в другое под действием возмущений, прилагаемых в различных точках системы одновременно или порознь. С целью упрощения первоначального анализа условимся считать: 1) АСР является одноконтурной (структурная схема рис. 1.2); 2) ди-

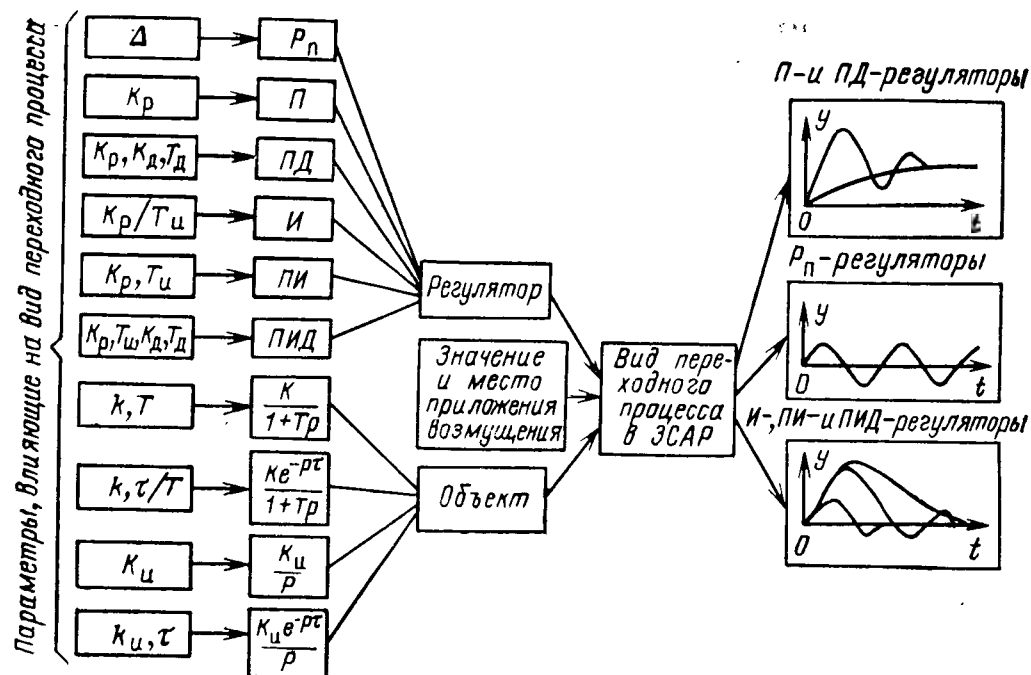


Рис. 4.1. Диаграмма возможных форм переходных процессов в АСР

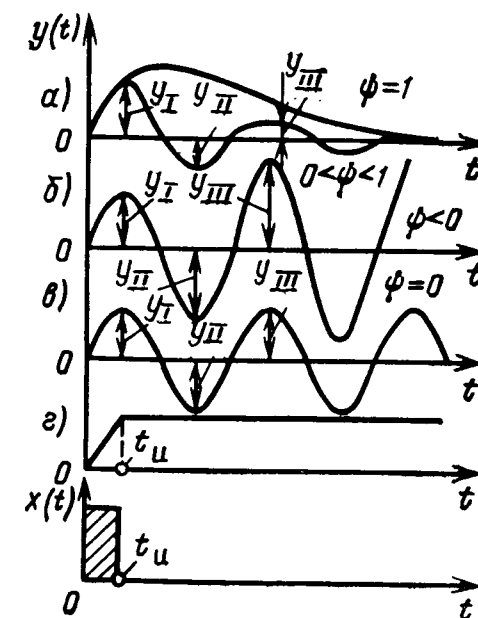
динамические свойства объекта регулирования описываются типовыми характеристиками (2.21) и (2.22); 3) регулятор — идеальный и осуществляет один из типовых законов регулирования — P_n , P , I , PD , PI и PID ; 4) возмущающее воздействие является однократным, ступенчатым по форме и прилагается в одной из точек замкнутой системы. При этих условиях форма процесса регулирования определяется динамическими свойствами объекта, законом регулирования и настройкой регулятора, местом приложения и численным значением возмущающего воздействия.

Будем также считать, что возмущения в систему поступают по трем каналам: со стороны нагрузки (x_n), со стороны регулирующего органа (x_p) и со стороны задатчика регулятора (u). Представление о многообразии устойчивых переходных процессов, которые могут иметь место в одноконтурной автоматической системе с принятыми вначале ограничениями, дает диаграмма, изображенная на рис. 4.1.

Под *устойчивостью* линейных систем при решении технических задач понимают способность системы, выведенной из установившегося состояния, снова к нему возвращаться после снятия возмущающих воздействий. Следовательно, об устойчивости систем (звеньев) можно судить по виду их импульсной характеристики или реакции системы (звена) на импульсное возмущение.

Рис. 4.2. Переходные процессы:

а — затухающие; б — расходящиеся; в — незатухающие колебательные; г — в нейтральной системе



Все физические системы с точки зрения устойчивости могут быть *устойчивыми, неустойчивыми и нейтральными*.

В технических задачах обычно исследуется устойчивость замкнутых систем и составляющих их динамических звеньев. Устойчивый переходный процесс в результате нанесения импульсного возмущения затухает со временем (рис. 4.2, а), неустойчивый — обладает расходящимися колебаниями (рис. 4.2, б). Переходный процесс на границе устойчивости имеет вид незатухающих колебаний (рис. 4.2, в). Переходный процесс, изображенный на рис. 4.2, г, считается нейтральным.

Автоматические системы регулирования теплоэнергетических установок чаще всего включают устойчивые или нейтральные звенья. Так, устойчивым является типовой теплотехнический объект с операторной характеристикой $W_p(p) = ke^{-p\tau} / (1 + pT)$ или временной характеристикой (см. рис. 2.5, а).

К нейтральным относятся объекты с типовой характеристикой $W_0(p) = k_n e^{-p\tau} / p$, например уровень воды в барабане парового котла при возмущении расходом питательной воды, а также I - или PI -регуляторы с характеристиками, изображенными в табл. 3.1. Однако замкнутые системы, включающие нейтральные или устойчивые звенья, при определенных условиях могут быть неустойчивыми или недостаточно устойчивыми, т. е. находиться вблизи границы устойчивости.

Динамические свойства объекта, находящегося в эксплуатации, как правило, можно считать постоянными вблизи номинальных или расчетных нагрузок. В связи с этим задача анализа устойчивости состоит в том, чтобы выяснить, при каких значениях изменяемых параметров настройки регулятора замкнутая система устойчива при различных возмущениях, действующих на систему порознь

и одновременно. Для исследования устойчивости можно воспользоваться двумя методами: прямым и косвенным.

Прямой метод предусматривает получение переходного процесса экспериментальным путем на действующей установке, ее модели или с помощью расчета на основе известных динамических характеристик звеньев, составляющих замкнутую систему. При этом для суждения об устойчивости системы необходимо располагать множеством реализаций отдельных переходных процессов, что требует больших затрат времени на проведение экспериментов и расчетов. Поэтому важно установить общие первоначальные требования к системе — *критерии устойчивости*, при помощи которых можно было бы судить об устойчивости системы без построения или экспериментального определения переходных процессов. Оценка систем при помощи таких критериев составляет сущность косвенных методов исследования устойчивости. При этом динамические характеристики объекта и регулятора должны быть представлены в одинаковой форме.

4.2. КОРНЕВОЙ И АЛГЕБРАИЧЕСКИЙ КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ

Предположим вначале, что требуемые характеристики объекта и регулятора даны в виде дифференциальных уравнений. На их основе составляется дифференциальное уравнение системы с регулируемой величиной $y(t)$ в качестве переменной

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = kx, \quad (4.1)$$

где n — порядок старшей производной; $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ — постоянные коэффициенты.

Известно, что решение уравнения (4.1) относительно $y(t)$ можно представить в виде двух составляющих, описывающих свободные и вынужденные колебания системы

$$y(t) = y_{св}(t) + y_{вын}(t),$$

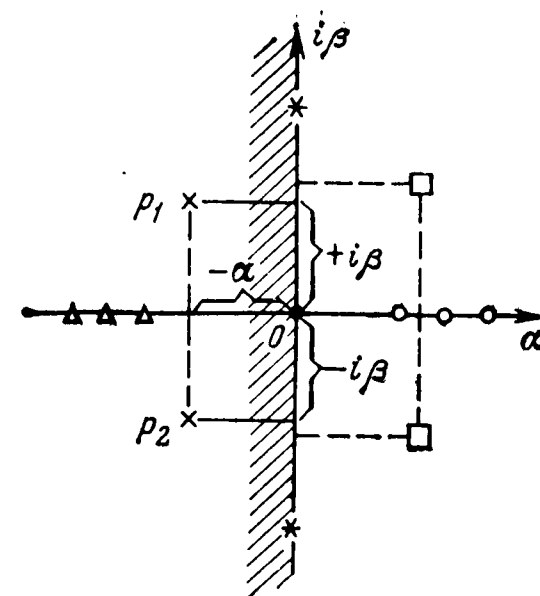
где $y_{вын}(t)$ определяется неснимающимся возмущением, приложенным к системе.

Поскольку об устойчивости системы можно судить по ее реакции на однократное импульсное возмущение, для изучения устойчивости можно ограничиться исследованием свободных колебаний регулируемой величины

$$y_{св}(t) = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t} + \dots + C_n e^{p_n t}, \quad (4.2)$$

Рис. 4.3. Расположение корней характеристического уравнения АСР на комплексной плоскости:

Δ — устойчивой системы — аperiodический процесс; $\times$ — устойчивой системы — колебательный процесс; $*$ — системы на границе устойчивости; $\circ, \square$ — неустойчивых систем; 0 — нейтральной системы



где $C_1, C_2, \dots, C_n$ — постоянные интегрирования; $p_1, p_2, \dots, p_n$ — корни характеристического уравнения (4.1), записанного в операторной форме:

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0. \quad (4.3)$$

Корни этого уравнения зависят от коэффициентов $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0$, и среди них могут быть: вещественные положительные $p_k^0 = +\alpha_k$; вещественные отрицательные $p_k^0 = -\alpha_k$; комплексные сопряженные с отрицательной вещественной частью $p_{1,2}^* = -\alpha_k \pm i\beta_k$; комплексные сопряженные с положительной вещественной частью $p_{1,2}^\square = \alpha_k \pm i\beta_k$; мнимые $p_{1,2}^x = \pm i\beta$; нулевые $p_k = 0$.

На рис. 4.3 показаны возможные случаи расположения корней характеристического уравнения АСР на комплексной плоскости $\alpha, i\beta$.

Составляющая $y_{св}(t)$ устойчивой системы должна стремиться к нулю по окончании переходного процесса

$$y_{св}(t) \rightarrow 0; \quad t \rightarrow \infty.$$

Для удовлетворения этого условия необходимо, чтобы все корни характеристического уравнения (4.3) были отрицательными, если они вещественные, или имели отрицательную вещественную часть, если они комплексные. Действительно, уравнение (4.2) в случае вещественных отрицательных корней можно переписать в следующем виде:

$$y_{св}(t) = C_1 e^{-\alpha_1 t} + C_2 e^{-\alpha_2 t} + \dots + C_n e^{-\alpha_n t}. \quad (4.4)$$

При комплексных корнях с отрицательной вещественной частью

$$y_{св}(t) = C_1 e^{(-\alpha_1 \pm i\beta_1)t} + C_2 e^{(-\alpha_2 \pm i\beta_2)t} + \dots + C_n e^{(-\alpha_n \pm i\beta_n)t}. \quad (4.5)$$

В последнем уравнении при $t \rightarrow \infty$, т. е. по окончании переходного процесса, так же как и в (4.4),

$$y_{св} \rightarrow 0.$$

На этой основе формулируется *корневой критерий устойчивости*: АСР устойчива, если корни ее характеристического уравнения являются вещественными отрицательными или комплексными с отрицательной вещественной частью, т. е. расположены в левой полуплоскости корней (заштрихованной на рис. 4.3). Если хотя бы один корень уравнения (4.3) будет вещественным, положительным или комплексным с положительной вещественной частью, то при $t \rightarrow \infty$ член, содержащий экспоненту с положительным α в уравнениях (4.4) и (4.5), будет неограниченно возрастать. Следовательно, будет неограниченно возрастать и $y_{св}(t)$.

Наличие двух сопряженных чисто мнимых корней приводит к появлению незатухающей колебательной составляющей $y_i(t)$ в выражении для $y_{св}(t)$:

$$y_i(t) = C_1 e^{\pm i\beta t} = C_1 (\cos \beta t \pm i \sin \beta t). \quad (4.6)$$

Система в этом случае будет находиться на границе устойчивости.

Система, характеристическое уравнение которой имеет хотя бы один нулевой корень, т. е. размещенный в начале координат на плоскости корней, при всех остальных корнях, располагающихся слева от оси ординат, считается нейтральной. В этом случае $y_{св}(t) = y_{1св}(t) + y_{2св}(t)$, где $y_{1св}(t)$ соответствует сумме экспонент с устойчивыми корнями, а $y_{2св}(t)$ — экспоненте с нулевым корнем p_k в (4.2).

При снятии возмущающего воздействия $y_{1св}(t) \rightarrow 0$; $y_{2св}(t) = C_k e^0$ (при $t \rightarrow \infty$), что соответствует определению нейтральной системы. При использовании для исследования устойчивости корневого критерия нужно определить лишь знак корней характеристического уравнения системы. Для характеристических уравнений системы, записанных в операторной форме, определение знака корней является чисто алгебраической операцией, которая выполняется с помощью *алгебраических критериев устойчивости*. Последние позволяют судить об устойчивости системы, не вычисляя корней ее характеристического уравнения.

В качестве примеров рассмотрим системы, описываемые дифференциальными уравнениями первого и второго порядка. Характери-

стическое уравнение инерционного звена первого порядка

$$a_1 p + a_0 = 0. \quad (4.7)$$

Условимся заранее, что коэффициент a_0 всегда положительный. В случае $a_0 < 0$ обе части уравнения (4.1) умножаются на -1 .

Корень уравнения (4.7) — $p_1 = -a_0/a_1$, т. е. вещественный отрицательный. Отсюда следует, что система первого порядка всегда устойчива, если коэффициенты ее характеристического уравнения a_1 и a_0 положительны. Для системы второго порядка, образованной объектом без самовыравнивания (интегральное звено) и ПИ-регулятором (4.6), характеристическое уравнение

$$a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0. \quad (4.8)$$

Корни (4.8)

$$p_{1,2} = -\frac{a_1}{2a_2} \pm \frac{\sqrt{a_1^2 - 4a_2a_0}}{2a_2}. \quad (4.9)$$

Для устойчивой системы, как известно, необходимо, чтобы корни $p_{1,2}$ лежали слева от мнимой оси в плоскости корней (рис. 4.3). Рассматриваемая система устойчива как в случае вещественных корней ($a_1 > 0$ и $a_1^2 > 4a_2a_0$), так и в случае комплексных корней ($a_1 > 0$, $a_1^2 < 4a_2a_0$).

Как следует из (4.9), положительность коэффициента a_1 является необходимым, но не достаточным условием устойчивости системы второго порядка. Для этого необходима также положительность коэффициентов a_2 и a_0 . Итак, необходимым и достаточным условием устойчивости систем первого и второго порядка служит положительность постоянных коэффициентов их характеристических уравнений. Это условие и будет алгебраическим критерием устойчивости для рассмотренных простых систем. Его математическая запись:

$$a_2, a_1, a_0 > 0. \quad (4.10)$$

По виду характеристического уравнения простых систем, описываемых уравнением не выше второго порядка, сравнительно просто можно произвести анализ их устойчивости путем прямого определения корней. Следует заметить, что условие положительности всех коэффициентов характеристического уравнения, выявленное при анализе уравнения второго порядка, служит необходимым условием устойчивости и для более сложных линейных систем. Но в этих случаях требование положительности всех коэффициентов характеристического уравнения не является достаточным.

Например, для системы третьего порядка с характеристическим уравнением

$$a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \quad (4.11)$$

кроме положительности коэффициентов a_3, a_2, a_1 и a_0 , требуется соблюдение дополнительного условия

$$a_1 a_2 > a_3 a_0 \quad (4.12)$$

[произведение средних коэффициентов в уравнении (4.27) должно быть больше произведения крайних]. Данное условие и будет достаточным для устойчивости замкнутой системы.

Для исследования на устойчивость систем более высокого порядка дополнительные условия и соответствующие расчеты усложняются¹.

4.3. ЧАСТОТНЫЙ КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Сложные системы целесообразнее исследовать на устойчивость с помощью частотных характеристик, которые могут быть получены экспериментально или аналитически по передаточным характеристикам системы и представлены в виде графиков.

Критерий Найквиста — Михайлова. Об устойчивости замкнутой системы с КЧХ $W_{з.с}(i\omega) = W_{р.с}(i\omega) / [1 + W_{р.с}(i\omega)]$ можно судить по расположению на комплексной плоскости годографа вектора КЧХ разомкнутой системы $W_{р.с}(i\omega)$ относительно критической точки с координатами $U(\omega) = -1$; $iV(\omega) = 0$ (рис. 4.4). Для исследования устойчивости в этом случае используется критерий Найквиста: замкнутая система устойчива, если годограф вектора ее КЧХ в разомкнутом состоянии $W_{р.с}(i\omega)$ не охватывает точку с координатами $U(\omega) = -1, iV(\omega) = 0$.

Охватываемая (заштрихованная) область остается справа при движении вдоль годографа $W_{р.с}(i\omega)$ в направлении увеличения ω . На рис. 4.6 изображены годографы КЧХ разомкнутых систем, которые в замкнутом состоянии устойчивы, неустойчивы или находятся на границе устойчивости.

¹ По известным коэффициентам характеристического уравнения можно проверить на устойчивость линейную систему n -го порядка с помощью алгебраических критериев Рауса—Гурвица, изложение которых можно найти в большинстве источников по теории автоматического управления, например в [2].

² Формулировка распространяется на системы устойчивые или нейтральные в разомкнутом состоянии. Доказательства частотных критериев устойчивости приводятся в [2].

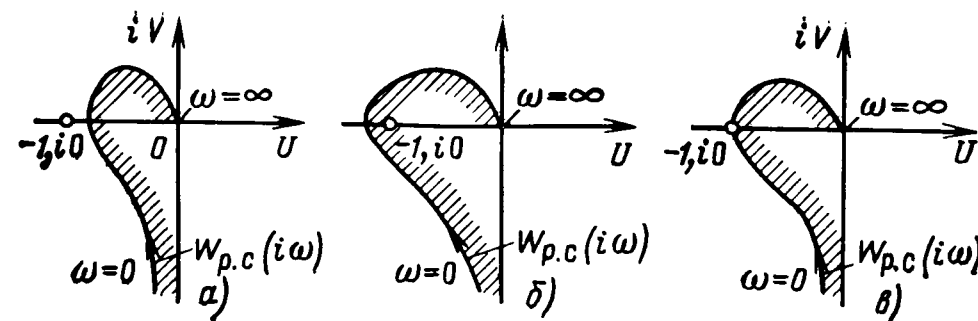


Рис. 4.4. Годографы векторов $W(i\omega)$ разомкнутых систем: а — устойчивой; б — неустойчивой; в — предельной

Данный критерий примечателен тем, что исходная динамическая характеристика разомкнутой системы $W_{р.с}(i\omega) = W_0(i\omega) W_p(i\omega)$ может быть получена экспериментально, например, с помощью методов, изложенных в § 1.4. Кроме того, с его помощью можно исследовать устойчивость систем, содержащих звенья запаздывания.

Сравнительная оценка критериев устойчивости. Ранее (§ 4.1) отмечалось, что методы исследования устойчивости АСР можно разделить на прямые и косвенные. Опытный прямой метод наиболее достоверен, но не всегда возможен или целесообразен в промышленных условиях. Во многих случаях целесообразно опытное исследование на математических моделях, построенных на основе аналоговых или цифровых вычислительных машин. При этом требуется знание исходных дифференциальных уравнений составных элементов системы.

Расчетный прямой метод определения устойчивости по известным дифференциальным уравнениям звеньев, образующих систему, можно применять всегда, но он трудоемок и требует последующей проверки. Однако данный метод позволяет исследовать систему на устойчивость до ее реализации в промышленных условиях.

Косвенный метод — по корням характеристического уравнения или коэффициентам исходного дифференциального уравнения системы с помощью корневого или алгебраического критерия — менее трудоемок по сравнению с расчетным прямым методом, но требует определенного навыка в расчете сложных систем. Он неприменим при исследовании систем, содержащих звенья запаздывания.

Частотный критерий Найквиста — Михайлова требует построения годографа КЧХ для разомкнутой системы $W_{р.с}(i\omega)$. Его преимущество перед предыдущим критерием

состоит в возможности анализа систем с запаздыванием и опытного определения $W_{p.c}(i\omega) = W_0(i\omega) W_p(i\omega)$.

4.4. ЗАПАС УСТОЙЧИВОСТИ

Рассмотренные способы проверки систем на устойчивость позволяют также определить, насколько исследуемая система близка к границе или пределу устойчивости.

Мерой удаления характеристик АСР от границы или предела устойчивости служит *запас устойчивости*. Для одной и той же системы запас устойчивости будет измеряться различными величинами в зависимости от принятого метода исследования. При использовании временных характеристик о запасе устойчивости судят по степени затухания $\psi = 1 - \frac{y^{\text{III}}}{y^{\text{I}}}$ переходных процессов, изображенных на

рис. 1.28 и 4.2. При этом предельным значением степени затухания, при котором система оказывается на границе устойчивости, будет $\psi = 0$ (рис. 4.5, кривая *a*).

При использовании косвенных методов исследования, в частности корневого критерия, о запасе устойчивости судят по расположению ближайшего к мнимой оси корня p_k или пары корней p_1 и p_2 характеристического уравнения системы (см. рис. 4.3). Показателем запаса служит число $m = \alpha/\beta = \text{tg} \varphi$ (рис. 4.6), называемое *степенью колебательности* системы и равное отношению действительной части α

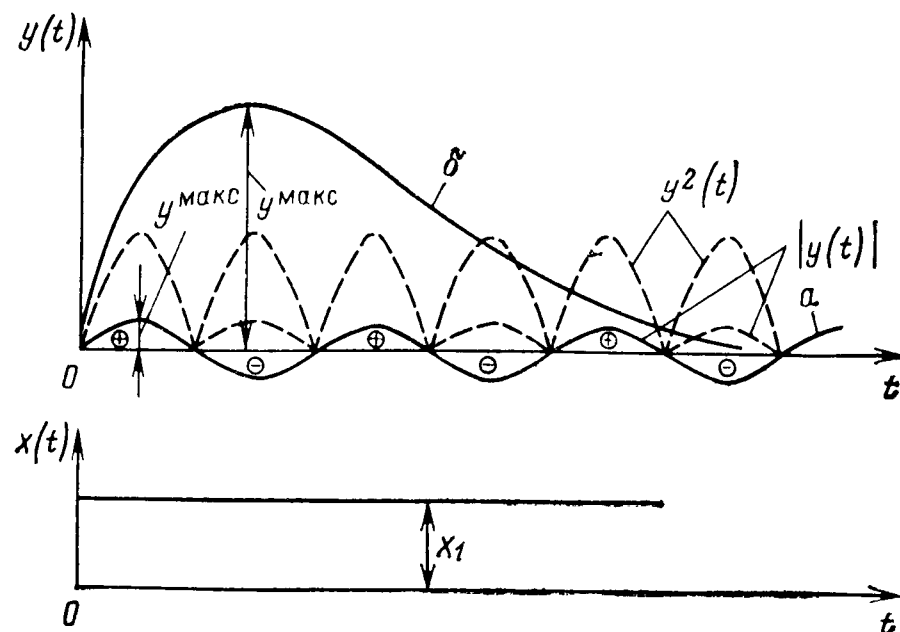


Рис. 4.5. Переходные процессы:
a — колебательный; *б* — аperiodический

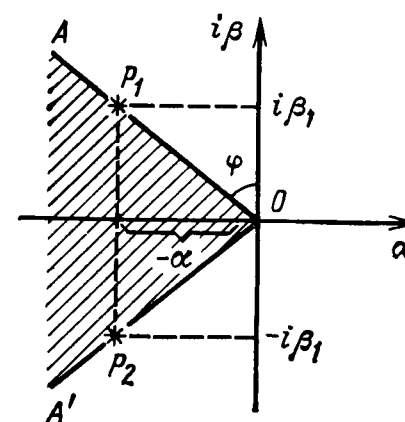


Рис. 4.6. Расположение корней характеристического уравнения системы с заданным показателем качества

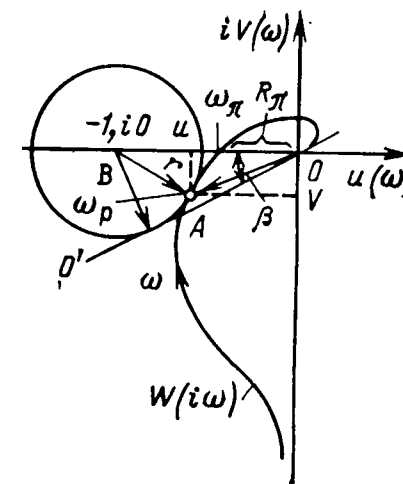


Рис. 4.7. Определение границы областей устойчивости и запаса устойчивости по расположению $W(i\omega)$ относительно критической точки $-1, i0$

к мнимой β для ближайшей к мнимой оси пары корней: p_1 и p_2 .

Расположение корней характеристического уравнения системы в секторе AOA' обеспечивает степень затухания переходного процесса $\psi = 1 - e^{-2\pi m}$.

При исследовании динамики систем с помощью частотных характеристик о наличии у системы некоторого запаса устойчивости можно судить по расположению годографа КЧХ разомкнутой системы относительно точки с координатами $-1, i0$ на комплексной плоскости (рис. 4.7).

Представив КЧХ замкнутой системы в виде отношения векторов, можно записать на основании (1.97):

$$W_{z.c} = y/u = W_{p.c}/(1 + W_{p.c}) = OA/(1 + OA) = OA/BA, \quad (4.13)$$

откуда следует, что при неизменном значении входного сигнала амплитуда на выходе замкнутой системы «объект — регулятор» будет возрастать с уменьшением BA . Максимальное отношение $OA/BA = |W_{z.c}(i\omega)|_{\text{макс}}$ имеет место при так называемой *резонансной* частоте колебаний ω_p , которой соответствует максимальная амплитуда $y(t)$ на выходе АСР или объекта.

Заметим, что положение ω_p на годографе $W_{p.c}(i\omega)$ соответствует точке касания его с окружностью радиусом r , т. е. точке A на рис. 4.7.

Отношение

$$|W_{z.c}(i\omega_p)| / |W_{z.c}(0)| = M, \quad (4.14)$$

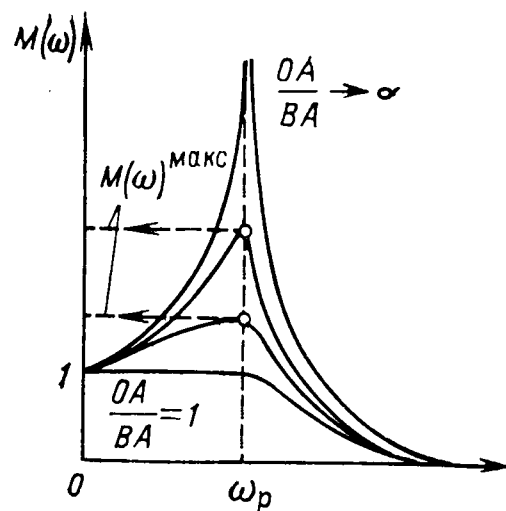


Рис. 4.8. График зависимости $M(\omega)$

где $|W_{з.с.}(i\omega_p)|$ и $|W_{з.с.}(0)|$ — модули векторов КЧХ замкнутой системы при частотах соответственно $\omega=0$ и $\omega=\omega_p$, называется **показателем колебательности**.

Если полагать, что в (4.14) $W_{з.с.}(0)=1$ (это допущение, справедливо для систем, имеющих интеграль-

ную составляющую в своей структуре, например для системы с ПИ-регулятором КФХ, которая представлена на рис. 4.9), то из формул (4.13) и (4.14) следует

$$M_{\max}(\omega) = \frac{OA}{BA_{\min}}(\omega_p) = |W_{з.с.}(i\omega_p)|_{\max}.$$

Графики $M(\omega)$ для различных значений отношения OA/BA систем, имеющих интегральную составляющую, приведены на рис. 4.8.

Из геометрических соотношений на рис. 4.7 нетрудно установить функциональную связь между r и M . Для этого модули векторов OA и BA (4.13) следует выразить через их мнимую и вещественную составляющие:

$$OA = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}; \quad BA = \sqrt{[1 - U(\omega)]^2 + V^2(\omega)}.$$

Тогда получим

$$\frac{U^2(\omega) + V^2(\omega)}{[1 - U(\omega)]^2 + V^2(\omega)} = M^2. \quad (4.15)$$

После преобразований (4.15) получим уравнение

$$U^2(\omega) + V^2(\omega) - 2 \frac{M}{M^2 - 1} U(\omega) + \frac{M^2}{M^2 - 1} = 0, \quad (4.16)$$

которое является уравнением окружности радиусом

$$r = M/(M^2 - 1). \quad (4.17)$$

Центр этой окружности расположен на отрицательной вещественной полуоси на расстоянии U_0 от начала координат:

$$U_0 = \frac{M^2}{M^2 - 1}. \quad (4.18)$$

Из рис. 4.7 видно, что указанная окружность касается также луча OO' , проведенного из начала координат под углом β к отрицательной полуоси:

$$\angle \beta = \arcsin \frac{r}{U_0} = \arcsin \frac{1}{M}. \quad (4.19)$$

С помощью соотношений (4.17) и (4.18) и графика КЧХ разомкнутой системы можно сформулировать условия, при соблюдении которых замкнутая система будет обладать заданным запасом устойчивости M .

Для того чтобы замкнутая система обладала заданным запасом устойчивости M , необходимо, чтобы КЧХ разомкнутой системы касалась окружности радиусом $r = M/(M^2 - 1)$ с центром на отрицательной вещественной полуоси

$$U_0 = M^2/(M^2 - 1).$$

Итак, для того чтобы замкнутая система была устойчивой, годограф вектора ее КЧХ в разомкнутом состоянии не должен охватывать точку с координатами $1, i0$ (см. рис. 4.7), а для выполнения условий заданного запаса устойчивости этот годограф не должен заходить внутрь «запретной» области, ограниченной окружностью с параметрами r (4.17) и U_0 (4.18), зависящими от заданного числа M .

Промышленные автоматические системы всегда должны обладать определенным запасом устойчивости, но чрезмерный запас в большинстве случаев противоречит требованиям качества процессов регулирования, о которых пойдет речь ниже. Наглядным примером этого может служить сравнение двух переходных процессов в замкнутой системе при одинаковых возмущениях x_1 , изображенных на рис. 4.5, если в качестве меры запаса устойчивости использовать степень затухания ψ .

Система *a* находится на границе устойчивости ($\psi=0$). Система *б* имеет максимальный запас устойчивости ($\psi=1$), но значительно уступает системе *a* по наличию в ней существенного отклонения регулируемой величины $y_{\max}$.

4.5. КАЧЕСТВО ПРОЦЕССОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Понятие о качестве процессов регулирования. Запас устойчивости является необходимым, но не достаточным условием оптимальности автоматической системы. От правильно спроектированной и хорошо отлаженной замкнутой системы *объект — регулятор* ожидают по крайней мере тех же результатов, что и в случае управления технологическим

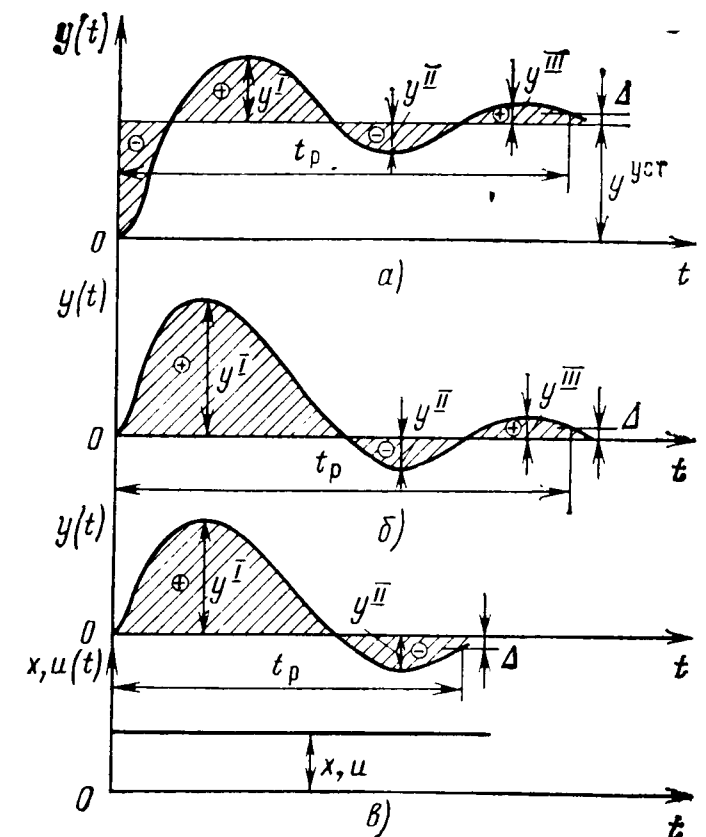
процессом опытным и квалифицированным оператором. С этой точки зрения процессы автоматического регулирования должны удовлетворять ряду дополнительных требований, по степени выполнения которых судят о качестве АСР. В реальных системах под качеством понимают совокупность показателей или критериев, позволяющих оценить характер отклонения регулируемой величины под действием изменяющихся возмущений и судить о том, насколько система удовлетворяет поставленным требованиям при заданных конкретных ограничениях.

Теплоэнергетические установки как объекты управления характеризуются следующими особенностями: 1) значительные по амплитуде и длительные отклонения регулируемой величины от заданного значения не только ухудшают экономические показатели основного оборудования, но также повышают вероятность его повреждения. Например, повышение температуры перегрева пара выше заданного значения может привести к повреждению труб пароперегревателя. В этом случае качество АСР связано с долговечностью работы (сроком службы) основного оборудования; 2) кратковременные, но значительные отклонения, так называемые «выбросы» регулируемой величины, также могут привести к повреждению основного оборудования. Например, перепитка барабанного парового котла водой может явиться причиной заброса воды в паропровод и повреждения турбины. Следовательно, качество АСР тесно связано с надежностью работы основного оборудования; 3) незначительные, но длительные и систематические отклонения регулируемой величины от заданного значения могут привести к ухудшению экономичности того или иного участка технологического процесса или установки в целом. Например, отклонение содержания кислорода в уходящих газах от оптимального значения приводит, даже при незначительном понижении КПД паровых котлов, к весьма ощутимому перерасходу топлива в масштабе крупной электростанции или энергосистемы. Качество АСР на этом участке тесно связано с экономичностью работы основного оборудования.

Следовательно, экономичность, надежность и срок службы основного оборудования ТЭС тесно связаны с качеством работы АСР. О качестве АСР можно судить либо по форме процесса регулирования при наиболее характерном или опасном однократном возмущении по одному из каналов воздействия, так называемому единичному процессу, либо по данным статистики, т. е. по среднесменным, суточным и

Рис. 4.9. Оценка качества по виду переходного процесса:

а — при возмущении задатчиком регулятора;
б, в — при возмущении нагрузкой или при возмущении со стороны регулирующего органа (расходом регулирующей среды)



месячным отклонениям регулируемых величин или числу «выбросов» за сутки, месяц или год.

Оценка качества по кривым переходных процессов. Вернемся к рассмотрению переходных процессов в замкнутой одноконтурной системе при нанесении ступенчатого возмущения со стороны задатчика регулятора (рис. 4.9, а) и со стороны регулирующего органа (рис. 4.9, б, в). Для оценки качества этих процессов используют следующие показатели:

1) максимальное отклонение регулируемой величины от ее установившегося значения: y^I — динамическая и $y^{уст}$ — статическая ошибки регулирования;

2) время регулирования t_p , определяемое промежутком времени от начала переходного процесса до момента, когда регулируемая величина будет отличаться от установившегося значения менее чем на некоторое заранее заданное значение Δ ;

3) степень затухания регулируемой величины (см. § 1.5)

$$\psi = (y^I - y^{III})/y^I;$$

4) перерегулирование

$$\xi = y^{II}/y^I. \quad (4.20)$$

За количественную меру перерегулирования принимается ξ , равное отношению максимального абсолютного отклонения отрицательного знака y^{II} к максимальному отклонению положительного знака y^{I} .

Система регулирования считается настроенной оптимально, если она удовлетворяет одновременно по крайней мере двум или трем показателям качества. Например, кроме максимального отклонения, которое должно быть не выше допустимого по условиям эксплуатации, степень затухания ψ и время регулирования t_p должны быть не ниже заданных значений.

Косвенные методы оценки качества. Рассмотренные выше методы оценки качества относятся к прямым методам исследования АСР. С их помощью трудно определить общие закономерности влияния изменяемых параметров системы (например, параметров настройки промышленных регуляторов) на характер переходного процесса. Для определения влияния изменяемых параметров АСР на ее качество используют косвенные методы оценки, которые позволяют установить характер переходного процесса без построения его графика.

Интегральные критерии. Обобщающим для прямых показателей качества переходных процессов (y^{I} , ψ и t_p) служит линейный интегральный критерий I , численно равный алгебраической сумме площадей (заштрихованных на рис. 4.9, б, в), заключенных между кривой регулируемой величины $y(t)$ и осью времени t или линией установившегося значения $y^{\text{уст}}$ для процесса, изображенного на рис. 4.9, а:

$$I = \int_0^{\infty} y(t) dt. \quad (4.21)$$

Практически $I = \int_0^{t_p} y(t) dt$, где t_p — время регулирования.

Численное значение линейного интегрального критерия можно получить, минуя построение $y(t)$, через передаточную функцию замкнутой системы и изображение возмущающего воздействия. Используя преобразование Лапласа—Карсона и определение передаточной функции [§ 1.4. Формула (1.11)], можно написать для системы при единичном ступенчатом возмущении

$$Y(p) = W_{\text{з.с.}}(p). \quad (4.22)$$

Подставляя (1.11) в (4.22), получаем

$$\int_0^{\infty} \dot{y}(t) e^{-pt} dt = \frac{W_{\text{з.с.}}(p)}{p}. \quad (4.23)$$

Левая часть этой формулы переходит в выражение линейного интегрального критерия, если p устремить в ней к нулю.

Следовательно,

$$I = \int_0^{\infty} \dot{y}(t) dt = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{W_{\text{з.с.}}(p)}{p}. \quad (4.24)$$

Оптимальный по значению линейный интегральный критерий равен минимальной (по возможности) площади между кривой переходного процесса $y(t)$ и осью времени t . Но использование линейного интегрального критерия в случаях значительной колебательности процесса может привести к ошибочной оценке качества АСР, как это следует из графика $y(t)$, приведенного на рис. 4.5. Здесь алгебраическая сумма площадей под кривой a , заштрихованных над и под осью времени t , равна нулю. Следовательно, линейный интегральный критерий I для незатухающих колебательных процессов, наихудших с точки зрения качества, равен нулю, т. е. своему предельному оптимальному значению. Поэтому для оценки качества колебательных процессов, в том числе слабо затухающих, используют интеграл от модуля регулируемой величины

$$I_M = \int_0^{t_p} |y(t)| dt. \quad (4.25)$$

В этом случае значения функции $|y(t)|$, показанной на рис. 4.5 пунктирной линией, и интеграла I_M не зависят от знака переменной. Однако из-за трудностей вычисления интеграла типа (4.25) для оценки качества слабо затухающих процессов удобнее использовать квадратичный интегральный критерий

$$I^2 = \int_0^{t_p} [y(t)]^2 dt. \quad (4.26)$$

Геометрическое представление этого интеграла показано на рис. 4.5.

Контрольные вопросы

1. От чего зависит форма переходного процесса в АСР?
2. Сформулируйте понятие устойчивости.
3. Как подразделяются физические свойства системы с точки зрения устойчивости?
4. В чем состоит сущность корневого критерия устойчивости? Укажите расположение корней характеристического уравнения на плоскости корней для устойчивой системы.
5. Приведите определение критерия устойчивости Найквиста и поясните его на комплексной плоскости.
6. Поясните понятие запаса устойчивости системы.
7. Назовите прямые показатели качества переходного процесса.
8. В чем сущность оценки качества переходных процессов по линейному интегральному критерию? Назовите виды интегральных критериев.
9. Как определяется показатель колебательности замкнутой системы M ?
10. Что такое степень колебательности m ?

Глава пятая

ВЫБОР ТИПА И РАСЧЕТ НАСТРОЕК АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА

5.1. ВЫБОР ТИПА РЕГУЛЯТОРА

Выбор закона регулирования осуществляется в зависимости от сложности и ответственности объекта управления и требований к точности поддержания регулируемой величины. Однако в большинстве случаев при проектировании автоматических систем регулирования на тепловых электрических станциях возможность выбора типа регулятора по виду реализуемого в нем закона регулирования ограничена, поскольку большинство систем предназначено для автоматической стабилизации параметров в узком диапазоне допустимых отклонений. В тех случаях, когда допускаются относительно большие колебания регулируемой величины, целесообразно устанавливать простейшие позиционные регуляторы, работающие по принципу открыто — закрыто и реализующие P -закон регулирования. При их наладке важно соблюдать одно требование (рис. 5.1)

$$\Delta y_{\max} \leq \Delta y_{\text{доп}}. \quad (5.1)$$

Для обеспечения этого условия пропускная способность регулирующего органа при его открытии должна превышать максимально возможные возмущения по нагрузке.

При более жестких требованиях к автоматической системе, например при недопустимости автоколебательных режимов, возникающих в системах с позиционными P -регуляторами, целесообразно проверить возможность установки P -регуляторов прямого действия — наиболее доступных и простых по конструкции.

Основанием для установки P -регулятора на объекте с самовыравниванием служит следующее неравенство:

$$\delta_{\text{опт}} \leq \frac{y_{\text{уст}}}{x \left(1 - \frac{y_{\text{ост}}}{y_{\text{уст}}} \right)}, \quad (5.2)$$

где $\delta_{\text{опт}}$ — численное значение оптимальной степени обратной связи регулятора, подсчитанное по формулам оптимальной настройки; $y_{\text{ост}}$ — максимально допустимое по условиям технологического процесса или безопасной работы объекта остаточное отклонение регулируемой величины; $y_{\text{уст}}$ — установившееся значение регулируемой величины по кривой переходного процесса (см. рис. 4.1, 4.2); x — максимально возможное ступенчатое возмущающее воздействие по нагрузке или эквивалентное возмущение со стороны регулирующего органа.

Для объекта без самовыравнивания возможность установки P -регулятора определяется из условия

$$\delta_{\text{опт}} \leq y_{\text{ост}}/x. \quad (5.3)$$

Если P и P -законы регулирования не удовлетворяют требованиям (5.1) — (5.3), то следует применить более сложные законы — ПИ или ПИД.

При выборе типа регулятора в основном следует руководствоваться: требованиями к качеству системы регулирования в реальных условиях эксплуатации; динамическими характеристиками объекта по каналам регулирующего и

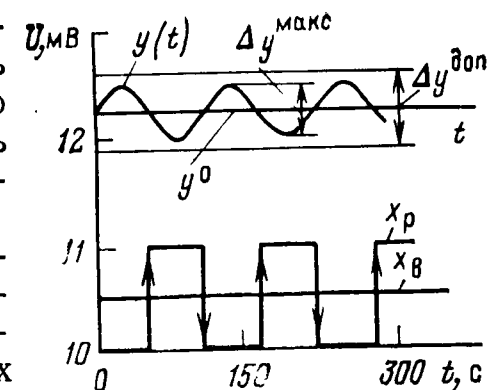


Рис. 5.1. График процесса регулирования температуры t в электрической печи двухпозиционным P -регулятором

возмущающего воздействий; номенклатурой заводов-изготовителей средств автоматизации.

Как показано в § 3.2, неотъемлемым звеном современных промышленных регуляторов служит сервопривод. При выборе типа сервопривода и его постоянной времени следует руководствоваться данными, приведенными в табл. 5.1.

5.2. ОСНОВЫ МЕТОДОВ РАСЧЕТА

Расчет настроек предусматривает определение численных значений параметров настройки регуляторов, обеспечивающих достижение выбранного *критерия управления* — соотношения, характеризующего качество работы объекта управления в целом и принимающего числовые значения в зависимости от используемых управляющих воздействий [5].

Обычно настройки рассчитываются лишь для одного из каналов воздействий, по которому система является наиболее чувствительной и может обеспечить компенсацию возмущений, поступающих на объект по другим каналам. При этом для большинства автоматических систем стабилизации технологических процессов ТЭС критерием управления служат: минимум динамической (статической) ошибки регулирования, минимум времени регулирования или же минимум линейного (квадратичного) интегрального показателя переходного процесса в замкнутой системе.

Существующие методы расчета позволяют определить численные значения параметров настройки регуляторов (с помощью формул или графиков) по показателям, характеризующим динамические свойства объекта или системы. При этом динамические свойства объекта могут быть представлены в виде временных характеристик, передаточных функций или частотных характеристик. Расчетные формулы или графики по определению оптимальных настроек основываются на оценке временных или частотных характеристик замкнутой системы с помощью показателей качества, рассмотренных в предыдущей главе.

Оценку качества промышленных систем автоматического регулирования следует производить не только по кривым переходных процессов, необходимо учитывать также ограничения, связанные с перемещением регулирующего органа. Нельзя, например, признать удовлетворительным процесс регулирования уровня воды в барабане парового котла, если основные показатели качества по регулируемой величине (отклонению уровня) выполняются за счет слишком

частых и быстрых перемещений регулирующего клапана, что приводит к резким колебаниям расхода питательной воды и повышенному износу пусковых элементов и арматуры. В таких случаях следует уменьшить скорость перемещения регулирующего органа с целью более плавных изменений расхода воды путем некоторой корректировки установленных (расчетных) значений параметров настройки. Настройки, обеспечивающие достижение выбранного критерия управления и удовлетворяющие принятым ограничениям по перемещению регулирующего органа, считаются оптимальными.

Ниже рассматривается ряд методов расчета оптимальных настроек П-, ПИ- и ПИД-регуляторов, используемых при наладке АСР на ТЭС.

Приводимые формулы и графоаналитические методы расчета настроек являются приближенными [1, 2, 4]. Вычисленные по ним значения параметров настройки требуют экспериментальной проверки на моделях АСР или в промышленных условиях. Отличие полученных в реальных условиях показателей качества от ожидаемых или расчетных объясняется идеализацией динамических свойств объектов при их замене типовыми характеристиками и искажениями закона регулирования и динамических характеристик регуляторов в реальной аппаратуре.

5.3. РАСЧЕТ НАСТРОЕК НА ЗАДАННОЕ M ПО УЧАСТКУ КЧХ ОБЪЕКТА

Основы расчета. Сущность метода заключается в графоаналитическом определении K_p для П-регулятора и K_p и T_n для ПИ-регулятора, при которых КЧХ разомкнутой системы касается окружности с заданными параметрами (4.17), (4.18):

$$r = M/(M^2 - 1), \quad U_0 = \frac{M^2}{M^2 - 1}.$$

Обычно при настройке промышленных АСР добиваются значений M в пределах 1,3—2,4. Если полагать, что форма колебательных переходных процессов на выходе объекта в основном определяется расположением ближайших к мнимой оси пары корней характеристического уравнения замкнутой системы (см. рис. 4.3), то выбор M в диапазоне чисел 1,3—2,4 позволяет обеспечить степень затухания переходного процесса в пределах $\psi = 0,75 \div 0,95$.

Численное значение заданного показателя колебатель-

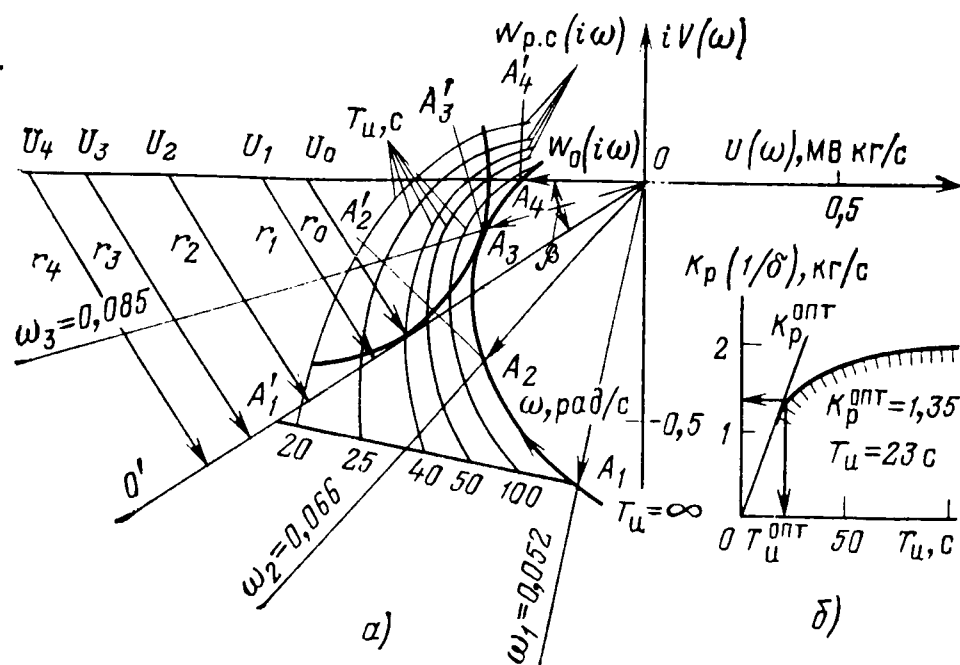


Рис. 5.2. Определение оптимальных параметров настройки П- и ПИ-регуляторов по участку КЧХ объекта:
 а — построение $W_{p.c}(i\omega)$ при $K_p=1$; б — определение оптимальных значений K_p (б) и T_{π} для ПИ-регулятора

ности выбирается исходя из двух условий: 1) обеспечения должного запаса устойчивости; 2) упрощения графоаналитических расчетов.

Первое условие выполняется при M , изменяющемся в пределах 1,3—2,4, первое и второе одновременно — при выборе M из соотношения $M/(M^2-1)=1$, т. е. при $M=1,62$ (этому значению M соответствует $\psi=0,9$). Убедимся в этом на примере расчета настроек П- и ПИ-регуляторов температуры воды на выходе поверхностного пароводяного теплообменника. Структурная схема замкнутой системы в обоих случаях изображена на рис. 1.2. Регулятор получает сигнал по отклонению температуры воды и воздействует на расход греющего пара.

Расчет настроек П-регулятора. Исходными данными для расчета служат участок КЧХ объекта по температуре (ΔU , мВ) по каналу регулирующего воздействия $D_{г.п.}$, расположенный в III квадранте комплексной плоскости (рис. 5.2, а); заданное значение $M=1,62$ ($\psi=0,9$) и передаточная функция П-регулятора $W_p(p)=K_p$.

Порядок операций следующий.

1. **Геометрические построения.** Из начала координат под углом к отрицательной полуоси, найденным из условия

$$(4.19) \quad \angle \beta = \arcsin \frac{1}{1,62} = 38^\circ, \text{ проводится луч } OO'.$$

Затем путем подбора радиуса проводится окружность с центром на отрицательной полуоси, касающаяся луча OO' и характеристики объекта $W_0(i\omega)$ (окружность радиусом r_0 на рис. 5.2).

2. **Расчетное определение оптимального значения K_p .** Окружность радиусом r_0 касается луча OO' и КЧХ разомкнутой системы для $K_p=1$; [$W_{p.c}(i\omega)=K_p W_0(i\omega)$]. Поэтому r_0 будет меньше требуемого по соотношению (4.17) значения $r=M^2/M^2-1$ в K_p раз: $r_0=r/K_p$.

Таким образом, оптимальное значение K_p , удовлетворяющее условию (4.17), определится по формуле

$$K_p = \frac{M}{M^2-1} \frac{1}{r_0}.$$

При выбранном $M=1,62$ оптимальный $K_p=1/r_0$. В рассматриваемом примере оптимальное значение $K_p=2,3$ кг/(с·мВ).

Расчет настроек ПИ-регулятора. Исходными данными для расчета оптимальных значений K_p и T_{π} служат тот же участок КЧХ объекта в III квадранте комплексной плоскости (рис. 5.2, а), заданное значение $M=1,62$ и передаточная функция ПИ-регулятора $W_p(p)=K_p(1+T_{\pi}p)/T_{\pi}p$.

Для системы с ПИ-регулятором можно построить семейство окружностей, одновременно касающихся луча OO' , проведенного из начала координат под углом $\beta=38^\circ$, и КЧХ разомкнутой системы, предварительно построенных для $K_p=1$ и различных значений T_{π} . Следовательно, для каждого T_{π} может быть определено K_p , при котором максимум амплитудно-частотной характеристики $W_{z.c}(i\omega)$ не будет превышать заданного значения $M=1,62$. Итак, можно определить множество значений K_p и T_{π} для ПИ-регулятора, удовлетворяющих заданному значению показателя запаса устойчивости M . Функциональная зависимость между K_p и T_{π} , отвечающая заданному значению M (кривая равного запаса устойчивости), строится в виде графика $K_p=f(T_{\pi})$ в координатах K_p-T_{π} .

Для определения оптимальных значений K_p и T_{π} используется дополнительный критерий управления — линейный интегральный показатель качества I , минимум которого соответствует максимуму отношения K_p/T_{π} .

Убедимся в этом на примере АСР с объектом $W_0(p)=ke^{-p\tau}/(1+pT)$ и ПИ-регулятором с $W_p(p)=K_p+K_p/T_{\pi}p$. На основании (4.24) запишем значение линейного инте-

грального критерия для $y(t)$ на выходе замкнутой системы при единичном ступенчатом возмущении по каналу регулирующего воздействия:

$$I = \int_0^{\infty} y(t) dt = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1}{p} \frac{W_0(p)}{1 + W_0(p)W(p)} = \frac{T_{\text{н}}}{K_p}. \quad (5.4)$$

Следовательно, минимум I будет соответствовать максимуму отношения $\frac{K_p}{T_{\text{н}}}$.

Условие минимума I дополняет первоначальные исходные данные для расчета оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора.

Порядок операций следующий.

1. На основе соотношения $W_{p.c}(i\omega) = W_0(i\omega)W_p(i\omega)$ строится семейство КЧХ разомкнутой системы для различных K_p и $T_{\text{н}}$.

При $K_p = 1$

$$W_{p.c}(i\omega) = W_0(i\omega) - i \frac{W_0(i\omega)}{\omega T_{\text{н}}}.$$

Полученное выражение является разностью векторов: $W_0(i\omega)$ и $W_0(i\omega)/\omega T_{\text{н}}$, повернутых относительно $W_0(i\omega)$ на 90° по часовой стрелке. Построение $W_{p.c}(i\omega)$ ведется в следующем порядке (рис. 5.2, а). Для годографа $W_0(i\omega)$ проводим несколько векторов OA_1, OA_2, OA_3, OA_4 с частотами $\omega_1 \rightarrow \omega_4$. К этим векторам в точках A_1, A_2, A_3 и A_4 восстанавливаем перпендикуляры $A_1A'_1, A_2A'_2, \dots, A_4A'_4$.

Определяются концы векторов КЧХ разомкнутой системы путем откладывания на каждом из перпендикуляров $A_iA'_i$ отрезков $-i \times \frac{W_0(i\omega)}{\omega T_{\text{н}}}$ (например, $OA_1/\omega_1 T_{\text{н}1}, OA_2/\omega_2 T_{\text{н}2}, \dots$ и т. д., всего четыре-пять значений). Найденные точки соединяются плавной кривой.

2. Из начала координат проводится луч OO' под углом 38° к отрицательной вещественной полуоси.

3. Путем подбора радиусов r_1, r_2, r_3 и r_4 проводят окружности с центром на отрицательной вещественной полуоси, касающиеся луча OO' и каждой из семейства КЧХ разомкнутой системы $W_{p.c}(i\omega)$.

4. В координатах K_p и $T_{\text{н}}$ строится кривая равных запасов устойчивости системы $K_p = f(T_{\text{н}})$: по оси ординат откладываются найденные значения $K_{p1} = 1/r_1; K_{p2} = 1/r_2; \dots; K_{pn} = 1/r_n$, а по оси абсцисс — соответствующие им значения времени $T_{\text{н}1}, T_{\text{н}2}, \dots, T_{\text{н}n}$. Точки с координатами $K_{p1}, T_{\text{н}1}; K_{p2}, T_{\text{н}2}; K_{p3}, T_{\text{н}3}$ и т. д. соединяют плавной кривой (рис. 5.2, б).

5. Оптимальные численные значения K_p и $T_{\text{н}}$ находятся из условия выполнения минимума интегрального показателя I или миниму-

ма отношения $K_p/T_{\text{н}}$. Для этого из начала координат проводят касательную к кривой $K_p = f(T_{\text{н}})$ на рис. 5.2, б.

Координаты точки касания $K_{p.\text{опт}}$ и $T_{\text{н.опт}}$ дают оптимальные значения параметров настройки ПИ-регулятора, удовлетворяющих заданному запасу устойчивости ($M=1,62$) и минимуму линейного интегрального показателя качества:

$$I_{\text{мин}} = 1 / \left(\frac{K_{p.\text{опт}}}{T_{\text{н.опт}}} \right)_{\text{макс}}.$$

5.4. РАСЧЕТ НАСТРОЕК ПО ВРЕМЕННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ОБЪЕКТОВ

Исходными данными для расчета настроек служат кривые переходного процесса при ступенчатом возмущении по каналу регулирующего воздействия. При расчетах оптимальных настроек регулятора они аппроксимируются (заменяются) кривыми математической модели объекта, состоящей из нескольких последовательно соединенных типовых звеньев, например запаздывающего и одноемкостного инерционного (с самовыравниванием) или нейтрального (без самовыравнивания). Простейшая аппроксимация осуществляется проведением касательной в точке перегиба к кривой переходного процесса или продолжением участка ее постоянного наклона к оси времени t . Обработка кривых показана на рис. 2.5.

При графической обработке вычисляют величины, характеризующие динамические свойства объекта: коэффициент усиления k (единиц отклонения y : единиц измерения x); постоянную времени T (с или мин); время запаздывания τ (с или мин); отношение τ/T — для объекта без самовыравнивания; коэффициент пропорциональности интегрирующего звена: $k_{\text{и}} = k/T$ или $k_{\text{и}} = b/\tau$ (единиц отклонения y : единиц измерения $x \times$ единиц времени).

Для определения настроек регулятора по вычисленным величинам рекомендуются расчетные формулы [1, табл. 5.1] для параметров K_p или $\delta, T_{\text{н}}$ и $T_{\text{д}}$ в П-, ПИ- и ПИД-регуляторах. Приведенные в табл. 5.1 настройки рассчитаны на степень затухания $\psi = 0,75$ и минимум квадратичного интегрального критерия

$$I_{\text{мин}}^2 = \int_0^{\infty} [y(t)]^2 dt$$

(для процессов регулирования в линейных АСР).

Пример. Рассчитать оптимальные параметры настройки ПИ-регулятора температуры, обеспечивающие затухающий процесс регулирования с $\psi=0,75$ по экспериментальной кривой (см. рис. 14.21) температуры Δt , мВ= $f(t)$ на выходе из подогревателя при возмущении расходом греющего пара $D_{г.п.}$.

1. Определение k , τ и T по методике, изложенной в § 4.4, $k=1,11$ мВ/(кг·с⁻¹); $\tau=18$ с; $T=50$ с.

2. Подсчет отношения $\tau/T=0,36$.

3. Определение оптимальных значений $K_{р.опт.}$, $T_{и.опт.}$.

Оптимальные значения K_p и $T_{и.опт.}$ определяются из табл. 5.1 по формуле для ПИ-регулятора и для отношения $1,5 > \tau/T > 0,2$; $K_p=1,2$ кг·с⁻¹/мВ; $T_{и.опт.}=0,8 T=40$ с.

5.5. РАСЧЕТ НАСТРОЕК ДВУХКОНТУРНЫХ АСР

Система регулирования с корректирующим и стабилизирующим регулятором. Двухконтурная схема автоматического регулирования (рис. 5.3) с одним корректирующим

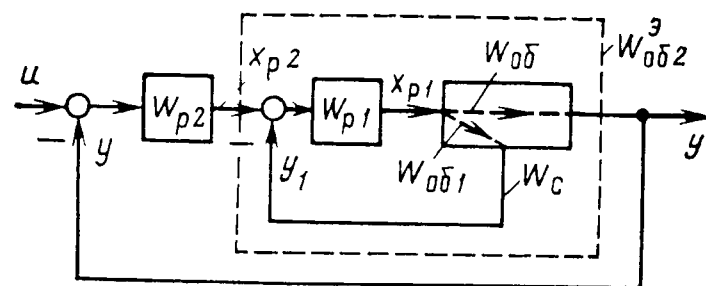


Рис. 5.3. Структурная схема двухконтурной АСР со стабилизирующим регулятором

и одним или несколькими стабилизирующими ПИ-регуляторами часто применяется на ТЭС, например, при поддержании давления пара в общем паропроводе.

В приведенной схеме основной сигнал y (давление пара в общей магистрали) поступает на вход корректирующего регулятора W_{p2} , а промежуточный сигнал y_1 (тепловыделение в топке) — на вход стабилизирующего регулятора W_{p1} . При этом стабилизирующий регулятор воздействует на подачу топлива. Методика определения оптимальных значений параметров настройки регуляторов двухконтурных систем основана на возможности расчета одного контура (стабилизирующего или внутреннего) с входным сигналом y_1 независимо от другого (корректирующего или внешнего) с входным сигналом y . Такой подход возможен в тех случаях, когда динамические свойства сигналов y и y_1

существенно различны. При этом настройка стабилизирующего регулятора может быть рассчитана независимо, например, по характеристике $W_{об1}(i\omega)$. После определения настроек стабилизирующего регулятора производится расчет оптимальных параметров настройки корректирующего регулятора W_{p2} [1, 4].

Для корректирующего регулятора объектом, называемым эквивалентным заменяющим $W_{об2}$, служит система, включающая стабилизирующий контур $W_c(p)$ и последовательно соединенный с ним объект с характеристикой $W_{об}(p)$ (на рис. 5.3 обведен пунктиром).

Передаточная функция стабилизирующего контура

$$W_c(p) = \frac{X_{p1}(p)}{X_{p2}(p)} = \frac{W_{p1}(p)}{1 + W_{p1}(p) W_{об1}(p)}. \quad (5.5)$$

Передаточная функция эквивалентного объекта

$$W_{об2}(p) = \frac{Y(p)}{X_{p2}(p)} = \frac{W_{p1}(p) W_{об}(p)}{1 + W_{p1}(p) W_{об1}(p)}. \quad (5.6)$$

Представим передаточную функцию $W_{p1}(p)$ в виде произведения

$$W_{p1}(p) = K_{p1} W'_{p1}(p), \quad (5.7)$$

где K_{p1} — коэффициент усиления P_1 .

Тогда

$$W_{об2} = \frac{W'_{p1}(p) W_{об}(p)}{1/K_{p1} + W_{об1}(p) W'_{p1}(p)}. \quad (5.8)$$

В этом выражении годограф вектора комплексной частотной характеристики разомкнутой системы $W_{p.c}(i\omega) = W_{об1}(i\omega) W'_{p1}(i\omega)$ строится по результатам проведения предыдущей операции по определению настроек стабилизирующего регулятора W_{p1} способом, изложенным в § 5.3, а годограф вектора КЧХ разомкнутой системы $W_{p.c2}(i\omega) = W_{об}(i\omega) W'_{p1}(i\omega)$ — по заданной комплексной частотной характеристике $W_{об}(i\omega)$ аналогичным способом.

Искомый годограф $W_{об2}(i\omega)$ строится по точкам на комплексной плоскости, определенным как частное от деления векторов $W_{об}(i\omega) W'_{p1}(i\omega)$ на векторы, проведенные для тех же частот к характеристике $W_{об1}(i\omega) W'_{p1}(i\omega)$ из точки, расположенной на отрицательной вещественной полуоси на расстоянии $1/K_{p1}$ от начала координат. После построения годографа вектора $W_{об2}(i\omega)$ производится определение на-

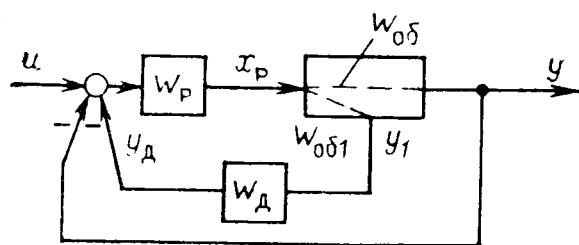


Рис. 5.4. Структурная схема двухконтурной АСР с дифференциатором

строек корректирующего регулятора W_{p2} методом, приведенным в § 5.3 (см. рис. 5.2).

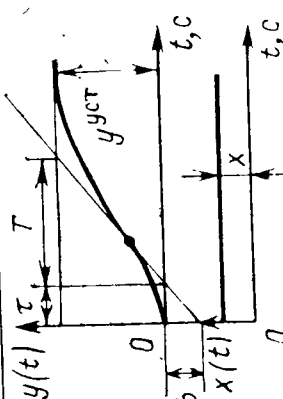
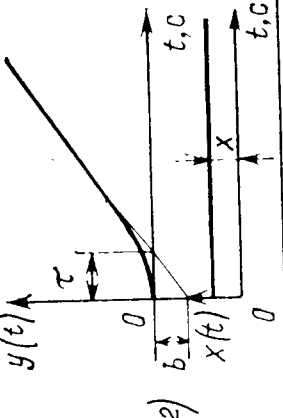
Система регулирования с введением исчезающего сигнала от промежуточной величины объекта. С целью улучшения качества процессов регулирования для объектов, обладающих значительной инерционностью, например температуры перегретого пара, используются системы регулирования с введением промежуточного сигнала y_1 , исчезающего после снятия возмущения, существенно меньшего по инерционности по сравнению с основным сигналом y . Структурная схема такой двухконтурной системы изображена на рис. 5.4, где $W_{об}(p)$ и $W_{об1}(p)$ — передаточные функции регулируемого участка относительно основного y и дополнительного y_1 сигналов; W_d — устройство для формирования исчезающего сигнала, обладающее характеристиками реального дифференцирующего звена [см. § 1.5, формула (1.77)]:

$$W_d(p) = Y_d(p)/Y_1(p) = K_d T_d p / (1 + p T_d).$$

В двухконтурной схеме, показанной на рис. 5.4, на вход ПИ-регулятора W_p поступают два сигнала: основной — по отклонению регулируемой величины и дополнительный, исчезающий в установившемся режиме с выхода дифференцирующего устройства. РД-звено (см. рис. 1.35 и 1.36) способно формировать на своем выходе значительный сигнал в первый момент времени после нанесения возмущения, т. е. при малых отклонениях $y(t)$, и, наоборот, иметь нулевой сигнал при установившемся значении $y(t)$. Указанное свойство РД-звена используется для увеличения быстродействия АСР при возмущениях со стороны объекта.

Расчет настроек по временным характеристикам. Исходными данными для расчетов служат кривые разгона опережающего и инерционного участков, по которым вначале составляются математические модели участков в виде соединения звеньев: запаздывания и инерционного первого порядка (2.21). Обработка кривых для определения параметров моделей ведется общепринятым способом, показанным, например, на рис. 2.5 и на табл. 5.1 [1].

Таблица 5.1. Обработка кривых для определения параметров моделей

Таблица 5.1. Обработка кривых для определения параметров моделей														
$k_c = \frac{y_{уст}}{x}, \text{ед. откл.} / \text{ед. возм.}$ $1) \frac{\tau}{T} = \frac{b}{y_{уст}}$						$k_u = \frac{b}{x} \frac{\text{ед. откл.}}{\tau}, \text{ед. возм.} \times x(t)$		$W_0(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{1+Tp}$ $1) W_0(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{1+Tp}$ $2) W_0(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{p}$		$\frac{\tau}{T} = 0-0,2$ $0,2 \leq \frac{\tau}{T} \leq 1,5$ $\frac{\tau}{T} \geq 0,5$		Регулятор		
Объект												Регулятор		
Настройка		П	ПИ	ПИД	П	ПИ	ПИД	П	ПИ	ПИД	П	ПИ	ПИД	
K_p		$1) \frac{1}{k} \frac{T}{\tau}$ $2) \frac{1}{k_u} \frac{1}{\tau}$	$1) \frac{0,9}{k} \frac{T}{\tau}$ $2) \frac{0,9}{k_u} \frac{1}{\tau}$	$1) \frac{1,25}{k} \frac{T}{\tau}$ $2) \frac{1,25}{k_u} \frac{1}{\tau}$	$\frac{0,38}{k}$	$\frac{\varepsilon}{T} + 0,6$ $\frac{\tau}{T} - 0,08$	$\frac{0,22}{k}$ $\frac{\tau}{T} + 1,5$ $\frac{\tau}{T} - 0,13$	$\frac{0,5}{k}$	$\frac{0,5}{k}$	$\frac{0,58}{k}$	$\frac{0,5}{k}$	$\frac{0,5}{k}$	$\frac{0,58}{k}$	
$T_{u,c}$		—	—	$3,3\tau$	$2,5\tau$	—	$0,8T$	—	—	$0,45T_0$	—	$0,6\tau$	$0,7\tau$	
$T_{d,c}$		—	—	—	$(0,15-0,25)T_u$	—	$(0,5-0,25)T_u$	—	—	—	—	—	$(0,15-0,25)T_u$	
$T_{c,c}$		$(1-4)\tau$	$(1-4)\tau$	$(1-4)\tau$	$(0,75-2)\tau$	$(1-4)\tau$	$(0,75-2)\tau$	$(1-4)\tau$	$(1-4)\tau$	$(1-4)\tau$	$(1-4)\tau$	$(1-4)\tau$	$(0,75-2)\tau$	

Для определения численных значений параметров настройки регулятора $\delta(K_p)$ и T_n по параметрам математической модели опережающего участка $\tau_{оп}$, $T_{оп}$, $k_{оп}$ рекомендуются нижеследующие приближенные формулы [1]. Для соотношений $0 \leq \tau_{оп}/T_{оп} \leq 0,1$:

$$\frac{1}{K_p K_d k_{оп}} = 0,68 \frac{\tau_{оп}}{T_{оп}} + 17,2 (\tau_{оп}/T_{оп})^2; \quad (5.9)$$

$$T_n/T_{оп} = 5\tau_{оп}. \quad (5.10)$$

Для соотношений $0,1 \leq \tau_{оп}/T_{оп} \leq 0,64$:

$$\frac{1}{K_p K_d k_{оп}} = 4,1 \frac{\tau_{оп}/T_{оп} - 0,07}{\tau_{оп}/T_{оп} + 0,4}; \quad (5.11)$$

$$T_n = 0,5T_{оп}. \quad (5.12)$$

Для расчета численных значений настроек дифференциатора K_d и T_d по параметрам модели инерционного участка $k_{ин}$, $\tau_{ин}$, $T_{ин}$ рекомендуются следующие ниже приближенные формулы. Для обычно встречающихся соотношений $0,1 \leq \tau_{ин}/T_{ин} \leq 0,6$ и $0 < T_{экв}/T_{ин} \leq 0,3$:

$$K_d = k_{ин} \left[0,2 + 2,7 \frac{T_{экв}}{T_{ин}} + 2,5 \left(1 - 2 \frac{T_{экв}}{T_{ин}} \right) \frac{\tau_{ин}}{T_{ин}} \right]; \quad (5.13)$$

$$T_d = T_{ин} \left[0,6 + 2 \frac{0,18 - T_{экв}/T_{ин}}{0,61 + T_{экв}/T_{ин}} \left(0,8 - \frac{\tau_{ин}}{T_{ин}} \right) \right], \quad (5.14)$$

где

$$T_{экв} = \frac{T_n}{K_p K_d k_{оп}}; \quad \frac{T_{экв}}{T_{ин}} = \frac{T_n}{K_d k_{оп} T_{ин} K_p}.$$

Пример. Определить настройки дифференциатора и регулятора в АСР температуры перегрева пара с исчезающим сигналом по температуре пара в промежуточной точке (см. рис. 11.14) по экспериментальным кривым разгона опережающего и инерционного участков первичного пароперегревателя, изображенных на рис. 11.16.

Исходные данные для расчета:

1. Параметры модели опережающего участка:

$$\tau_{оп} = \tau_1 = 18 \text{ с}; \quad T_{оп} = T_1 = 42 \text{ с}; \quad k_{оп} = 0,65 \text{ мВ}/(\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}); \\ \tau_{оп}/T_{оп} = 0,42.$$

2. Параметры модели инерционного участка

$$\tau_{ин} = \tau_2 = 45 \text{ с}; \quad T_{ин} = T_2 = 195 \text{ с}; \quad k_{ин} = 0,5 \text{ мВ}/(\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}); \\ \tau_{ин}/T_{ин} = 0,23.$$

Расчет. Определяются параметры системы по формулам (5.11), (5.12)

$$\frac{1}{K_p K_d k_{оп}} = 4,1 \frac{0,42 - 0,07}{0,42 + 0,4} = 1,75;$$

$$T_n = 0,5T_{оп} = 0,5 \cdot 42 = 21 \text{ с}; \quad T_{экв} = \frac{T_n}{K_p K_d k_{оп}} = 1,75 \cdot 21 = 37 \text{ с}.$$

Определяются параметры настройки дифференциатора по формулам (5.13), (5.14):

$$K_d^{опт} = 0,5 \left[0,2 + 2,7 \frac{37}{195} + 2,5 \left(1 - 2 \frac{37}{195} \right) \cdot 0,23 \right] = 0,6 \frac{\text{мВ}}{\text{кг/с}};$$

$$T_d^{опт} = 195 \left[0,6 + 2 \frac{0,18 - 0,19}{0,61 + 0,19} (0,8 - 0,23) \right] = 114,3 \text{ с}.$$

Определяют параметры настройки регулятора, используя найденное значение K_d :

$$K_p^{опт} = \frac{1}{1,75 \cdot 0,6 \cdot 0,65} = 1,47 \frac{\text{кг/с}}{\text{мВ}};$$

$$T_n^{опт} = 0,5 \cdot 42 = 21 \text{ с}.$$

Контрольные вопросы

1. Какие параметры настройки имеют П-, ПИ- и ПИД-регуляторы?
2. Что называется критерием управления?
3. Какие настройки считаются оптимальными?
4. Как рассчитать оптимальные настройки ПИ-регулятора по временной характеристике объекта?
5. В чем заключается графоаналитический метод расчета оптимального значения K_p для П-регулятора по КЧХ объекта?
6. Рассчитайте параметры настройки ПИД-регулятора температуры для $\psi=0,75$ по кривой разгона объекта, изображенной на рис. 12.24.
7. В чем состоит сущность метода расчета настроек стабилизирующего и корректирующего регулятора в двухконтурной автоматической системе регулирования?
8. Поясните порядок расчета настроек дифференциатора и регулятора по временным характеристикам основного (инерционного) и опережающего участков.

Часть вторая

АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Глава шестая

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРАХ

6.1. ПРОМЫШЛЕННЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ И ИХ ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

В зависимости от вида внешнего источника энергии промышленные автоматические регуляторы делятся на электрические, пневматические, гидравлические и комбинированные (электропневматические и электрогидравлические) системы.

Автоматические системы непрямого регулирования позволяют развивать сравнительно большие динамические усилия при перемещении регулирующего органа и обеспечивают возможность территориального разделения объекта, автоматического регулятора и исполнительного механизма; централизацию управления технологическим процессом; удобный переход с автоматического управления на дистанционное; увеличение быстродействия и точности АСР.

Функциональная схема замкнутой системы с регулятором непрямого действия приведена на рис. 6.1. Передача воздействий с выхода объекта 1 на вход (регулирующий орган 2) осуществляется регулятором, который представлен в виде цепочки последовательно соединенных звеньев [первичный прибор 3, измерительное устройство 4, задатчик ручного управления 5, командно-усилительное устройство 6 (регулирующий блок) и исполнительное устройство 7].

Первичный прибор служит для измерения регулируемой величины и преобразования ее во входной сигнал регуля-

Таблица 6.1. Измерительные устройства для измерения неэлектрических величин

Термоэлектрический термометр (термопара)
Термометр сопротивления
Трубчатая пружина
Мембрана
Дифманометр для измерения расхода жидкости или газа

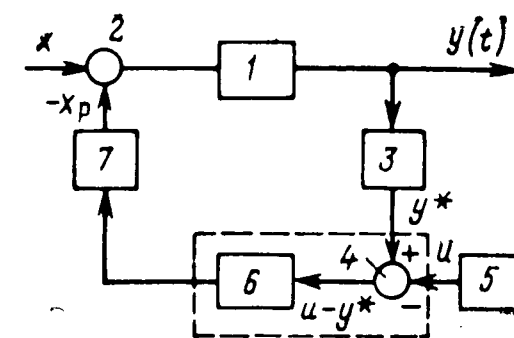


Рис. 6.1. Функциональная схема замкнутой системы, состоящей из объекта и регулятора

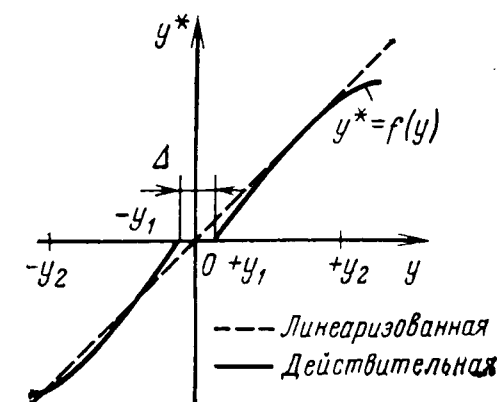


Рис. 6.2. Статическая характеристика датчика

тора $y^*(t)$. В качестве измерительных устройств теплотехнических первичных приборов используются мембраны, манометрические пружины, термопары, термометры сопротивления и пр. [16]. Основные типы измерительных устройств для измерения неэлектрических величин схематически показаны в табл. 6.1.

Преобразование регулируемой величины — входного сигнала первичного прибора в его выходной сигнал (входной сигнал регулятора) осуществляется непосредственно измерительным устройством (датчиком), например термопарой

или специальными преобразователями. Преобразователи служат для усиления мощности сигналов, а также для их унификации. При этом унифицированный сигнал рассчитан на многократное использование в нескольких приборах или регуляторах одновременно. Применение датчиков и преобразователей с унифицированным выходным сигналом (например, 0—5, 1—5, 0—20, 4—20 мА и 0—10 В для электрических сигналов) предусматривается Государственной системой приборов (ГСП) [8].

Требования к датчикам промышленных регуляторов.
Направленность действия (свойство детектирования). Изменение выходного сигнала датчика не должно оказывать влияния на входную величину.

Высокая чувствительность и малая инерционность. Временная характеристика чувствительного элемента должна максимально приближаться к характеристике усилительного звена (см. рис. 1.20).

Линейность статической характеристики. Зависимость выходного сигнала датчика от входного должна быть близка к линейной (рис. 6.2) в рабочем диапазоне измерений регулируемой величины.

Чаще всего встречаются два вида нелинейностей $y^* = f(y)$. Первая — на интервале $0 \pm y_1$, *зона нечувствительности* — $\Delta/2$ — связана с наличием трения и присуща всякой механической системе. Вторая — на интервале $y_1—y_2$ — связана с принципом измерения и его реализацией. Нелинейности первого и второго вида могут существенно снизить точность и быстродействие автоматического регулятора. Нелинейность характеристики датчика также оказывает влияние на точность расчетов промышленных АСР, в основу которых положены операции с линейными звеньями.

Высокая надежность. Отказ в работе первичного прибора может привести к отказу или ложным действиям АСР в целом. Датчики устанавливаются непосредственно на объекте, часто находятся в контакте с измеряемой средой, поэтому они должны обладать высокой устойчивостью по отношению к термическим и механическим воздействиям, вибрации, коррозии и т. п. Защита датчиков от этих воздействий иногда усложняет их конструкцию, снижает их быстродействие и чувствительность.

Измерительное устройство служит суммирующим звеном в цепочке звеньев автоматической системы, показанной на рис. 6.1. В нем осуществляется алгебраическое суммирование заданного и текущего значений регулируемой величины. На вход измерительного устройства одновремен-

но могут поступать несколько различных сигналов, при этом он имеет несколько входов и один выход. К измерительным устройствам промышленных регуляторов подводится энергия, необходимая для преобразования и усиления входных сигналов. Требования к измерительным устройствам регуляторов:

возможность компенсации сигналов, поступающих от датчиков;

линейность и стабильность статической характеристики, связывающей изменения входного и выходного сигналов;

безынерционность действия;

возможность суммирования входных сигналов.

Задатчик ручного управления предназначен для формирования сигнала, соответствующего заданному значению регулируемой величины. Входом задатчика служит положение органа, устанавливающего это значение, выходом — сигнал, соответствующий заданному значению той же формы, что и выходной сигнал первичного прибора. Например, если первичный прибор имеет на выходе напряжение постоянного тока, то и с выхода задатчика должно поступать напряжение постоянного тока. Конструктивно задатчик может быть встроен в измерительный блок регулятора или установлен на щите управления. Требования к задатчикам:

высокая стабильность выходного сигнала;

достаточный диапазон изменения сигнала, позволяющий компенсировать постоянную составляющую регулируемой величины.

Командно-усилительное устройство предназначено для преобразования выходного сигнала измерительного блока и усиления его до значений, необходимых для управления исполнительным механизмом. КУУ участвует в формировании закона перемещения регулирующего органа. Входом КУУ служит выходной сигнал измерительного блока $y^* = y - u$, выходом — сигнал, управляющий исполнительным механизмом. В состав КУУ промышленных электрических регуляторов входят многоступенчатые усилители постоянного тока, построенные на интегральных микросхемах, объединенных в одном модуле [6].

Трансформаторный усилитель. В нем используется принцип повышения (понижения) напряжения, индуцированного во вторичной обмотке трансформатора переменного тока. Коэффициент усиления

$$K_y = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = W_2/W_1,$$

где W_1 и W_2 — числа витков первичной и вторичной обмоток.

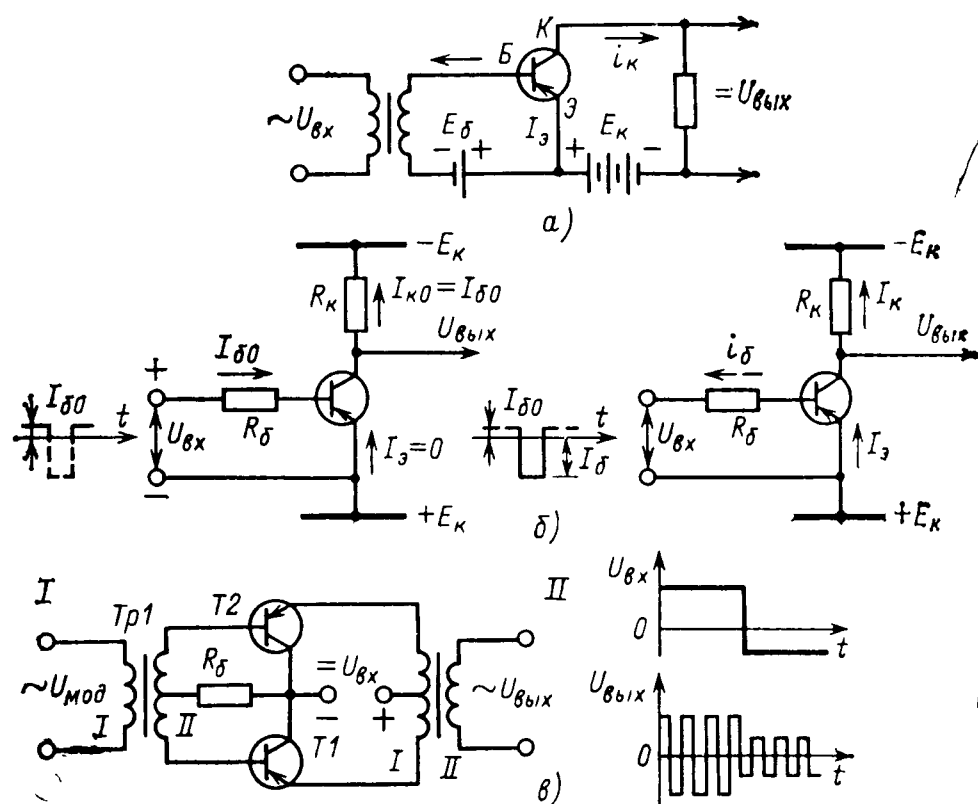


Рис. 6.3. Принципиальные электрические схемы усилителей:
а и б — полупроводниковый усилитель; Б — база (промежуточный слой); К — коллектор; Э — эмиттер; E_6 — источник смещения; E_n — источник питания; в — модулятор; I — схема модулятора; II — графики входного и выходного напряжения модулятора $U_{bx}(t)$ и $U_{bx1}(t)$

Трансформаторы относятся к усилителям преобразовательного типа и используются обычно для преобразования входного сигнала по напряжению и гальванического разделения цепей.

Полупроводниковый усилитель (рис. 6.3, а). Входной сигнал U_{bx} вводится в участок цепи между базой Б и эмиттером Э, а нагрузочное сопротивление — между эмиттером и коллектором К. Общим электродом для выходной и входной цепей служит эмиттер. Усилитель, собранный по такой схеме, обеспечивает одновременное усиление тока и напряжения.

Полупроводниковый ключ (нелинейный усилитель мощности). Действие ключа соответствует двум его стабильным положениям (закрыто—открыто). Картина токораспределения в цепях ключа изображена на рис. 6.3, б (1 и 2).

Для того чтобы триод (и тем самым ключ) был надежно «заперт» (рис. 6.3, б; 1), его базе должен быть сообщен положительный потенциал (не менее 0,5—1 В) по отношению к эмиттеру.

В этом случае эмиттерный переход не пропускает тока ($I_3=0$, ключ «заперт»), а через коллекторную и базовую цепи проходит тепловой ток $I_{60}=I_{ko}$.

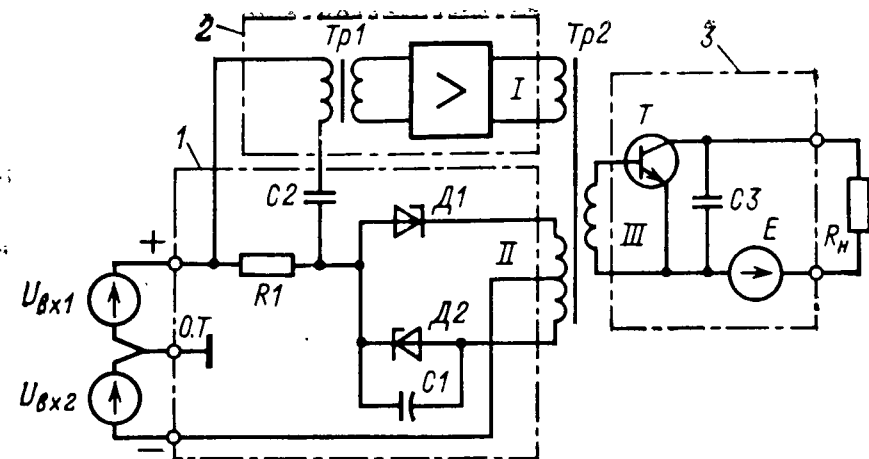


Рис. 6.4. Принципиальная электрическая схема операционного усилителя постоянного тока

При полностью открытом ключе (рис. 6.3, б; 2) через его коллекторную цепь проходит ток $I_k \approx E_k/R_k$. Для того чтобы такой ток мог пройти через базу, в нее необходимо вводить электронный ток $I_{6n} = I_k/B$ (минимально необходимое значение), где B — коэффициент передачи тока. В действительности для повышения стабильности открытого положения ключа в его базу вводится ток $I_6 > I_{6n}$, что переводит триод в режим насыщения (нелинейного усиления).

Полупроводниковый усилитель преобразовательного типа (модулятор). В качестве преобразователя постоянного тока в переменный применяется полупроводниковый модулятор. Одна из схем модулятора приведена на рис. 6.3, в; 1. Преобразуемый сигнал (постоянное входное напряжение U_{bx}) подведен одним полюсом к общей точке связи коллекторов полупроводниковых триодов Т1 и Т2, другим — к средней точке первичной обмотки выходного трансформатора Tr2. Переменное выходное напряжение в виде разнополярных прямоугольных импульсов (рис. 6.3, в; II) снимается с зажимов обмотки II. Модулирующее напряжение, управляющее частотой преобразования, подведено через трансформатор Tr1 к базам триодов и от средней точки вторичной обмотки через общий базовый резистор R_6 к общей точке связи коллекторов. Под действием $\sim U_{mod}$ триоды Т1 и Т2 открываются поочередно и также поочередно пропускают ток. Частота выходного сигнала переменного тока при этом равна модулирующей.

Операционный усилитель постоянного тока. В качестве примера рассмотрим однополярный усилитель типа УВ22, имеющий токовый входной сигнал 0—5 мА (рис. 6.4). Усилитель образуют три составных элемента: входной преобразователь 1, высокочастотный транзисторный усилитель 2, полупроводниковый выпрямитель 3. Входной преобразователь построен на параметрической мостовой схеме, образованной двумя стабилитронами Д1 и Д2 и обмотками II согласованного трансформатора Tr2. Входной сигнал подается на Д1 и Д2 через огра-

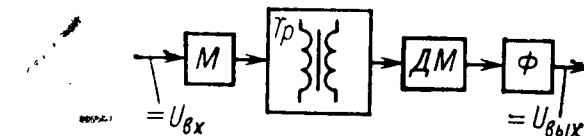
ничающий резистор R_1 и среднюю точку обмотки II Тр2. Параметрический мост, балансируемый переменным конденсатором $C1$, включается в цепь обратной связи усилителя 1 с помощью трансформаторов Тр1 и Тр2. Знак и степень обратной связи зависят от разбаланса мостовой схемы в ту или иную стороны, определяемого знаком и уровнем входного сигнала. С помощью конденсатора $C1$ создается такая начальная положительная обратная связь, при которой на выходе усилителя еще не появляются автоколебания. Затем подается некоторый положительный входной сигнал, изменяющий емкость $D1$ и $D2$ и ведущий к увеличению степени положительной обратной связи через параметрический мост. В замкнутом контуре «усилитель—мост» возникают автоколебания с амплитудой, зависящей от входного напряжения, и частотой около 1 МГц. Автоколебания становятся устойчивыми благодаря некоторой нелинейности усилителя, играющей роль демпфера (коэффициент передачи усилителя уменьшается с ростом амплитуды входного сигнала). Автоколебания с выхода усилителя поступают через Тр2 на вход выпрямителя 3, собранного на транзисторе Т. Выпрямленный ток усиливается этим транзистором и выделяется на резисторе являющегося нагрузкой. Резистор R_n и конденсатор $C3$ образуют временной фильтр — апериодическое звено с постоянной времени $T_\phi = C_3 R_n$, сглаживающий пульсации выпрямленного напряжения.

При подаче отрицательного входного сигнала обратная связь в замкнутом контуре становится отрицательной, автоколебания на его выходе отсутствуют — сигнал на выходе операционного усилителя становится равным нулю.

Входное сопротивление УВ22 составляет более 100 МОм, выходной ток 0—5 мА (при $R_n = 2 \div 3$ кОм); крутизна статической характеристики в координатах «входной сигнал—выходной сигнал» составляет 1,5 мА/мВ. Выходные цепи усилителя гальванически изолируются от входных через трансформатор Тр2.

Гальваническое разделение цепей осуществляется в связи с опасностью появления ложного заземления линий связи. В многоконтурных АСР и многоступенчатых КУУ гальваническая изоляция между отдельными частями системы позволяет локализовать (подавить) помехи, возникающие в отдельных цепях, и не дать им распространиться на всю цепь управления. В общем случае гальваническое разделение цепей осуществляется в соответствии с функциональной схемой блока, приведенной на рис. 6.5. Модулятор M преобразует входной сигнал постоянного тока в последовательность импульсов. Далее сигнал проходит через разделительный трансформатор, обеспечивающий собственно гальваническое разделение входных и выходных цепей. Демодулятор $ДМ$ осуществляет фазочувствительное выпрямление сигнала. Последний сглаживается временным фильтром Φ [7].

Рис. 6.5. Функциональная схема блока гальванического разделения цепей



Основные требования к усилителям и статическим преобразователям всех типов: 1) направленность действия; 2) достаточно высокий и стабильный коэффициент усиления; 3) малая инерционность; 4) линейность статической характеристики в широком диапазоне изменений входного сигнала (для усилителей, относящихся к классу линейных).

6.2. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА РЕГУЛЯТОРОВ

Исполнительные устройства регуляторов (сервоприводы) предназначены для перемещения регулирующего органа, с которым они сочленяются посредством механических передач. Исполнительное устройство развивает усилие, необходимое для перестановки регулирующего органа (клапана, задвижки, поворотной заслонки и т. п.), за счет использования энергии внешнего источника, которая подводится к нему непосредственно или через КУУ.

Сервопривод характеризуется двумя основными показателями: усилием, развиваемым поршнем (или крутящим моментом на выходном валу), и максимальным ходом поршня (или углом поворота выходного вала).

Автоматическое управление исполнительным механизмом от управляющего сигнала с выхода КУУ обычно дублируется посредством ручного или дистанционного управления. Перевод с автоматического управления на дистанционное осуществляется с помощью переключателя управления.

По виду используемого источника энергии исполнительные механизмы (ИМ) подразделяются на электрические, гидравлические и пневматические.

Каждый из названных механизмов разделяется по характеру движения сервоприводов на три группы.

Сервоприводы с постоянной скоростью. Выходной вал или поршень сервопривода перемещается с постоянной скоростью независимо от значения управляющего сигнала. Уравнение движения

$$T_c \frac{dx_p(t)}{dt} = \pm 1, \quad (6.1)$$

где x_p — перемещение выходного вала или поршня; T_c — время, необходимое для перемещения регулирующего органа из одного крайнего

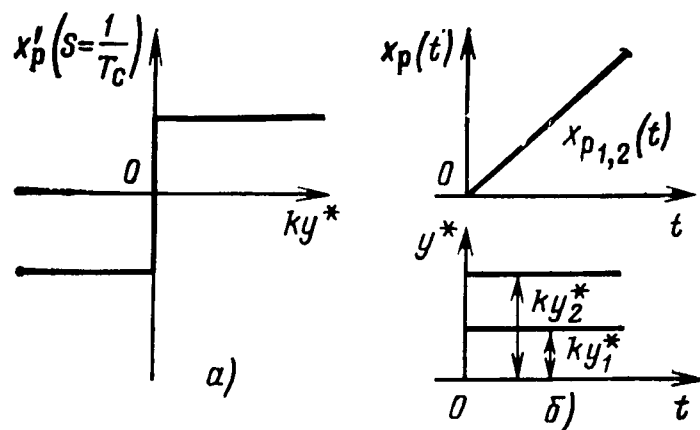


Рис. 6.6. Характеристики сервопривода с постоянной скоростью:
а — скоростная; б — временная

положения в другое; знак правой части уравнения зависит от направления движения.

Величина, обратная T_c , называется *скоростью перемещения* S . График уравнения (6.1) — скоростная характеристика сервопривода с постоянной скоростью — приведен на рис. 6.6, а. Сервопривод, описываемый уравнением (6.1), представляет собой интегрирующее звено с коэффициентом пропорциональности $1/T_c$. Его временная характеристика приведена на рис. 6.6, б. К сервоприводам с постоянной скоростью относятся электрические исполнительные механизмы. Они состоят из электродвигателя, сочлененного с редуктором. Включение (дистанционное или автоматическое) и отключение двигателя осуществляются магнитным пускателем. Характеристиками электрического сервопривода служат крутящий момент на выходном валу $M_{кр}$, чистота вращения электродвигателя n , об/мин, передаточное число редуктора $i = n_{эл}/n_{сш}$ и угол поворота выходного вала.

Сервоприводы с переменной скоростью. Выходной вал редуктора или поршень сервопривода перемещается со скоростью, пропорциональной значению управляющего сигнала:

$$\left. \begin{aligned} T_c \frac{dx_p(t)}{dt} &= Ky^*(t); \\ x_p &= \frac{K}{T_c} \int_0^\infty y^*(t) dt, \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

где K — размерный коэффициент; T_c — время полного хода сервопривода, обусловленное его конструкцией и значением входного сигнала.

Скоростная характеристика $dx_p(t)/dt = x'_p(t) = f(Ky^*)$ приведена на рис. 6.7, а, временная — на рис. 6.7, б. Как следует из уравнения

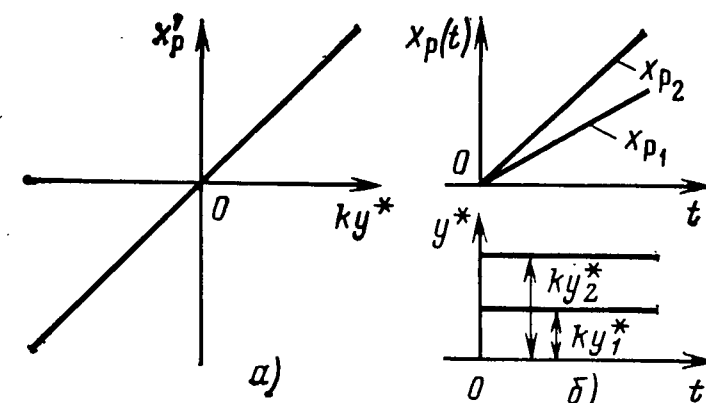


Рис. 6.7. Характеристики сервопривода с переменной скоростью:
а — скоростная; б — временная

(6.2), сервоприводы с переменной скоростью имеют характеристику интегрирующего звена с коэффициентом пропорциональности K/T_c . К сервоприводам с переменной скоростью относится, например, исполнительный механизм, показанный на рис. 1.1.

Сервоприводы с пропорциональной скоростью. Скорость движения штока или выходного вала сервопривода такого типа пропорциональна скорости изменения управляющего сигнала

$$\frac{dx_p(t)}{dt} = \frac{K dy^*(t)}{dt}. \quad (6.3)$$

Его скоростная характеристика приведена на рис. 6.8, а, переходная, или разгонная, — на рис. 6.8, б. Как следует из уравнения (6.3) и соответствующих ему временных характеристик, рассматриваемый сервопривод представляет собой пропорциональное звено. Примером сервопривода с пропорциональной скоростью перемещения служит пневматический или гидравлический мембранный сервопривод с уравновешивающей пружиной (рис. 6.9).

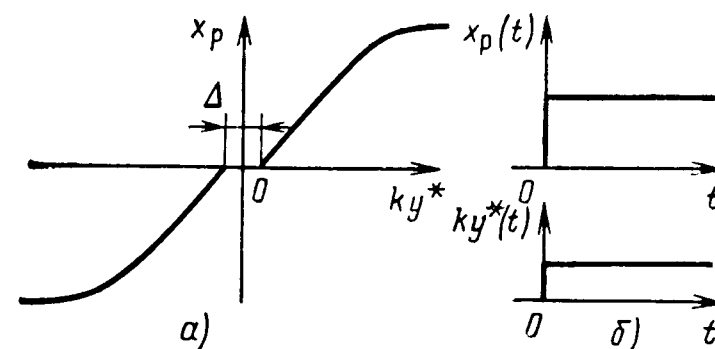


Рис. 6.8. Характеристики сервопривода с пропорциональной скоростью:
а — статическая; б — разгонная

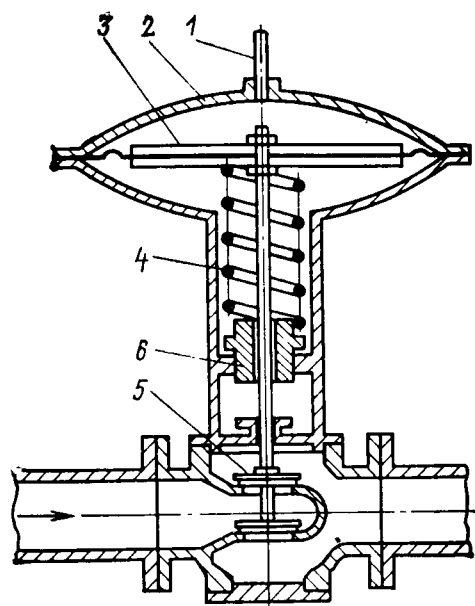


Рис. 6.9. Мембранный исполнительный механизм:

1 — подводящая трубка; 2 — корпус; 3 — мембрана; 4 — пружина; 5 — клапан; 6 — втулка

Общим недостатком сервоприводов всех типов являются разгон и выбег выходного вала или поршня, связанные с инерционностью вращающихся или движущихся масс. Разгон характеризуется временем разгона Δt_p , выбег — временем полувывега $\Delta t_v/2$. Обычно Δt_p невелико. Как следует из графика движения поршня или вала (рис. 6.10), на долю $\Delta t_v/2$ приходится наиболее существенное дополнительное перемещение x_p после снятия управляющего сигнала. Выбег сервоприводов может существенно искажать динамические характеристики регулятора. Для устранения выбега предусматриваются специальные тормозные устройства (механические, электрические, электромагнитные).

Требования к сервоприводам промышленных регуляторов:

некоторый запас мощности по отношению к максимальному перестановочному усилию (примерно 25 % — чрезмерный запас экономически невыгоден);

минимальный выбег Δt_v (рис. 6.10);

отсутствие «мертвого хода» или зоны нечувствительности (см. рис. 6.8); реверсирование хода, т. е. возможность изменения направления движения в зависимости от знака управляющего сигнала.

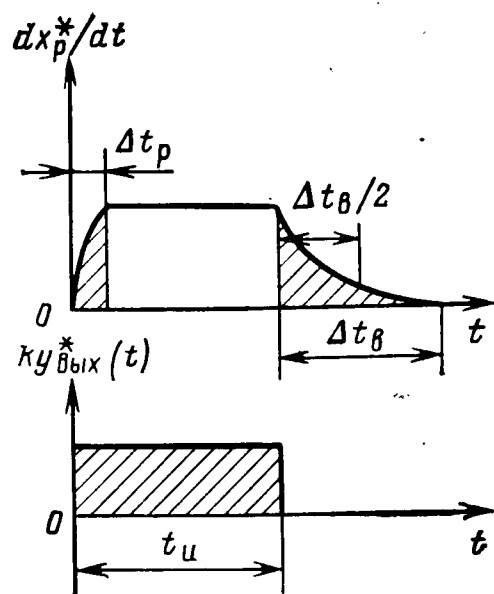


Рис. 6.10. Характеристика «выбега» сервопривода

6.3. ФОРМИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ЗАКОНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ РЕЖИМЕ

Автоматизация тепловых процессов на ТЭС в СССР в основном осуществляется на базе электрических регуляторов, включающих первичный прибор, регулирующий прибор и исполнительный механизм. Исполнительный механизм, конструктивно выполняемый в виде колонки дистанционного управления и электропривода с редуктором, размещается отдельно от регулирующего прибора и может управляться специальным ключом дистанционного управления.

В промышленных электрических регуляторах, имеющих структурную схему, изображенную на рис. 6.11, в качестве

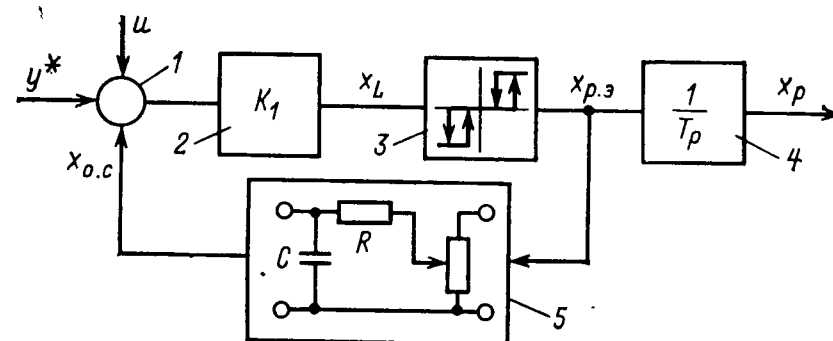


Рис. 6.11. Функциональная схема промышленного регулятора с нелинейным элементом в прямом канале усиления, охваченном обратной связью

второй ступени усиления КУУ работает трехпозиционное реле. Регуляторы такого типа относятся к релейно-импульсным автоматическим регуляторам.

В типовом регуляторе используется сервопривод с постоянной скоростью перемещения регулирующего органа $S=1/T_c$, в качестве устройства обратной связи — RC-цепочка (инерционное звено первого порядка) с передаточной функцией $W_{o.c}(p) = \frac{k_{o.c}}{1+T_p p}$ и кривой переходного процесса в виде экспоненты

$$x_{o.c}(t) = k_{o.c} x_{p.э} (1 - e^{-t/T}), \quad (6.4)$$

где $T=RC$.

Рассмотрим характер перемещения сервопривода релейно-импульсного регулятора при подаче на вход измерительного блока 1 ступенчатого сигнала $y^*(t)$ (например, перемещением ручки задатчика). На выходе первой ступени усиления 2 сигнал имеет значение $x_1=k_1 y^*$. При превышении этим сигналом зоны нечувствительности прямого хо-

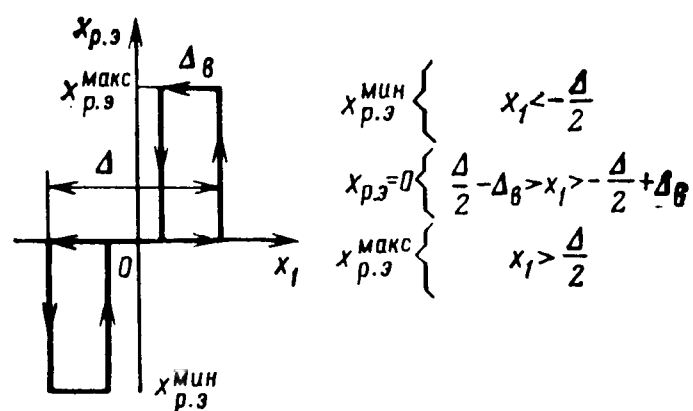
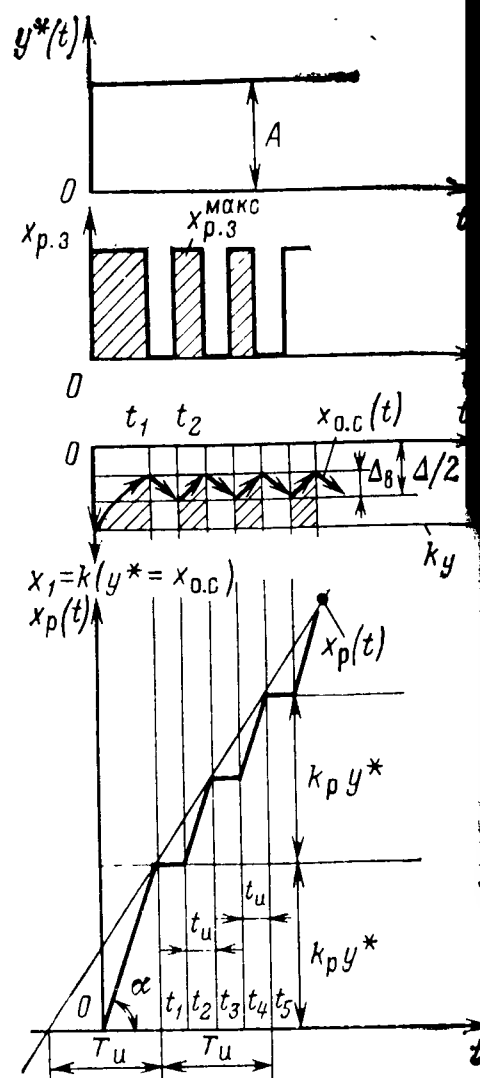


Рис. 6.12. Статическая характеристика трех позиционного реле

Рис. 6.13. Кривая разгона ПИ-регулятора в пульсирующем режиме



да трехпозиционного реле $x_1 > \frac{\Delta}{2}$ (рис. 6.12), т. е. в момент времени $t=0$ (рис. 6.13), произойдет включение реле и ступенчатый сигнал $x_{p.з}$ через пусковое устройство включит сервопривод 4, который начнет перемещаться с постоянной скоростью $x'_p(t)=S$. Одновременно сигнал $x_{p.з}$ поступит на вход устройства обратной связи 5.

Сигнал на входе RC-цепочки обратной связи $x_{o.с}(t)$ будет изменяться по экспоненте в соответствии с уравнением (6.4). Поскольку обратная связь в данной схеме является отрицательной, нарастающий по экспоненте сигнал $x_{o.с}(t)$ будет вычитаться в блоке сравнения 1 из постоянного сигнала $y^*(t)$, и в момент времени t_1 , когда их разность, усиленная в k раз, станет меньше зоны нечувствительности обратного хода $\Delta/2 - \Delta_b$ трехпозиционного релейного элемента, последний отключится. Это приведет к разрыву цепи управления сервоприводом и остановке последнего. В то же время скачком исчезнет сиг-

нал на входе устройства обратной связи. Конденсатор C начнет разряжаться через резистор R . Сигнал $x_{o.с}$ начнет уменьшаться по экспоненте, а разность $x_1(t) = k[y^*(t) - x_{o.с}(t)]$ возрастет из-за постоянства $y^*(t)$. В момент t_2 , когда x_1 вновь превысит зону нечувствительности прямого хода $x_1 > \Delta/2$, произойдет повторное включение реле в ту же сторону. Одновременно начнет перемещаться сервопривод регулятора, а ступенчатый сигнал $x_{p.з}$ вновь поступит на вход RC-цепочки обратной связи.

Описанный цикл будет повторяться до тех пор, пока на входе измерительного блока будет оставаться сигнал $y^*(t)$. Сервопривод при этом будет перемещаться до срабатывания концевого выключателя электрического двигателя. Соединив вершины ступенчатой линии перемещения сервопривода $x_p(t)$ прямой, получим идеализированный график переходного процесса регулятора с релейным усилителем, являющийся его реакцией на входной ступенчатый сигнал $y^*(t)$.

Полученная графическая зависимость $x_p(t)$ идентична переходному процессу линейного регулятора, ее наклон при $t > t_1$ определяется постоянной времени RC-цепочки обратной связи. Чем больше T и чем меньше крутизна экспоненты $x_{o.с}(t)$, тем меньше угол наклона α графика переходного процесса регулятора $x_p(t)$ к оси времени. Иными словами, динамические свойства промышленного релейно-импульсного регулятора также определяются параметрами устройства обратной связи: $k_{o.с} = \delta$ и $T = T_{и}$, которые служат параметрами настройки ПИ-регулятора.

Итак, сервопривод регулятора с релейным элементом, охваченным инерционным устройством обратной связи, движется прерывисто во времени при подаче на его вход ступенчатого сигнала. Описанный режим работы регулятора носит название *пульсирующего*. Соблюдение этого режима необходимо и при реализации других типовых линейных законов регулирования в регуляторах с релейным усилителем.

Математическое условие возникновения пульсирующего режима регулятора при подаче на его вход ступенчатого сигнала определяется из соотношения

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{K_p}{T_{и}} y^* < \frac{dx_p(t)}{dt}, \quad (6.5)$$

где $dx_p(t)/dt = S = 1/T_c$ — постоянная скорость перемещения регулирующего органа; K_p и $T_{и}$ — численные значения установленных в регуляторе параметров настройки; y^* — ступенчатый сигнал на входе измерительного блока регулятора.

x

**Ф
П**

**Ф
П**

- J
-
- F
-
- J
-
- F
-
- (

J
F
J
F
(J
F
J
F
(J
F
J
F
(J
F
J
F
(J
F
J
F
(J
F
J
F
(J
F
J
F
(J
F
J
F
(J
F
J
F
(

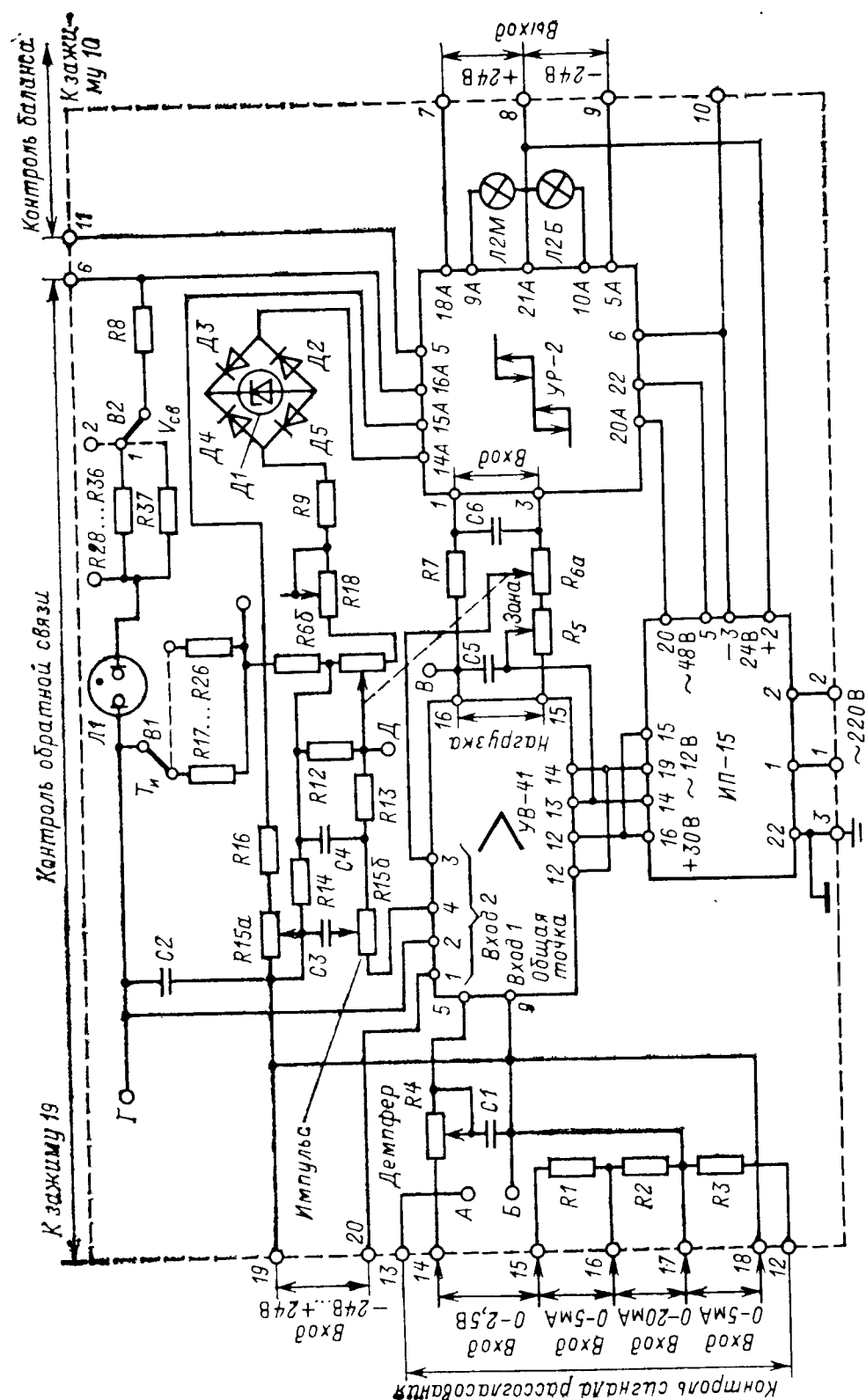


Рис. 7.2. Принципиальная электрическая схема Р-21

трехпозиционного релейного усилителя — магнитно-тиристорный типа УР-2. Последний имеет регулируемые зоны нечувствительности 2 (Δ) и возврата 4 (Δ_B) (см. рис. 6.12). ПИ-закон регулирования формируется в пульсирующем режиме с помощью исполнительного механизма и главной отрицательной обратной связи 3, охватывающей оба усилителя и выполненной на базе инерционного звена 1-го порядка (R_1C_2 -цепочки) (см. рис. 6.13). Настроечные органы цепей обратных связей объединены в модуль статических и динамических настроек блока — модуль динамики. Усилители блока питаются от источника питания, выполненного в виде отдельного модуля.

Принципиальная электрическая схема Р-21 показана на рис. 7.2. Сигнал постоянного тока 0—5 мА поступает на резистор R_1 через зажимы 15—16, а сигнал 0—20 мА — на R_2 через зажимы 16—17. Они преобразуются на входных резисторах в сигналы постоянного напряжения и суммируются с сигналом 0—2,5 В, поступающим на вход демпфирующего устройства через зажимы 14—15. Сигнал 0—5 мА, поступающий на R_3 через зажимы 17—18, не демпфируется и поступает непосредственно на вход усилителя. Демпфер представляет собой инерционную R_4C_1 -цепочку с переменным резистором R_4 , регулирующим постоянную времени демпфирования T_{df} . Непосредственно на вход усилителя через зажимы 18—20 может быть подан также сигнал ± 24 В. Все неиспользуемые входы блока закорачиваются.

Усилитель УВ-41 выполнен двухступенчатый на базе двух последовательно включенных транзисторов. Выходной каскад усилителя построен на третьем транзисторе, коллекторная цепь которого вместе с диодным мостом выполняет роль низкочастотного демодулятора. Усилитель в целом охвачен через резистор R_5 глубокой отрицательной обратной связью, которая способствует повышению стабильности его характеристик. Итак, входом усилителя с высокоомным сопротивлением входа (более 100 МОм) служит сигнал по напряжению постоянного тока (0 ± 10) мВ; выходом с нагрузкой 10 кОм — сигнал постоянного тока — ($0 \pm 0,5$) мА. Коэффициент усиления УВ-41 находится в пределах 40—60 мкА/мВ, частота опорного напряжения — ($50 \pm 0,1$) Гц. Питание усилителя осуществляется от модуля источника питания сглаженным напряжением постоянного тока 30 В и напряжением переменного тока 12 В.

Сигнал с выхода УВ-41 преобразуется в релейном усилителе УР-2 в напряжение постоянного тока ± 24 В в зависимости от фазы (знака) входного сигнала $y(y^*)$. Релейный усилитель собран на базе магнитного усилителя, управляющая обмотка которого подключена к выходу усилителя постоянного тока. Релейные свойства усилителя достигаются путем включения тиристоров T_1 и T_2 в цепи его нагрузки.

Электрическая нагрузка модуля УР-2 (не менее 72 Ом) подключается к зажимам 7—8—9.

Модуль УР-2 питается от источника питания несглаженным двухполупериодным (пульсирующим) напряжением 24 В постоянного тока (питание тиристоров) и напряжением переменного тока 48 В (питание обмоток возбуждения магнитного усилителя).

При срабатывании УР-2 одновременно с появлением напряжения ± 24 В на зажимах 7—8—9 на выходе УР-2 возникает напряжение импульсной формы 0—24 В. С зажима 15А—16А это напряжение подается на вход устройства главной отрицательной обратной связи блока Р-21, а с зажима 14А—15А — на цепь местной положительной обратной связи.

В момент, когда сигнал $U_{o.c}$ превышает пороговое значение напряжения зажигания находящейся в цепи обратной связи неоновой лампы НЛ, начинается заряд конденсатора С1 главной обратной связи и конденсатора С3 местной обратной связи. При срабатывании блока УР-2 в другую сторону напряжение $U_{o.c}$ и ток зарядов конденсаторов С2 и С3 меняют знак. Скорость заряда конденсатора обратной связи С2 определяется его емкостью (постоянная величина) и суммой резисторов — постоянного и переменного (ступенчатого) В2 (R28—R37), изменением которого можно установить расчетный коэффициент усиления регулятора K_p в целом. Постоянная времени разряда конденсатора С2, происходящего в момент прерывания сигнала $U_{o.c}$ [постоянная интегрирования ПИ-регулятора $T_n = R_{в1} C_2$ — с. (3.22)], определяется переменным (ступенчатым) резистором В1 (положением ручки переключателя В1). Длительность включений (длительность импульса) t_n устанавливается движком переменного резистора R156 (ручка «импульс»). Влияние зоны нечувствительности (ручка переменного резистора R6) на зону возврата или длительность импульса устраняется путем спаривания ручек R6a и R156, а взаимовлияние главной обратной связи и t_n — спариванием переменных резисторов R15a и R156. Резисторы R12—R14 и конденсатор С4 дополнительно уменьшают зависимость t_n от влияния обратной связи и зоны нечувствительности.

Конструктивно блок выполнен в виде металлического шасси и сварного корпуса, размером 80×160×508 мм, являющихся одинаковыми для всех блоков системы; масса блока 8 кг. Для контроля и настройки блока его шасси выдвигается из корпуса. При этом электрические связи шасси с колодкой зажимов, расположенной на задней стенке корпуса, не нарушаются и обеспечиваются гибким кабелем.

Для полного извлечения шасси из корпуса необходимо разъединить штепсельный разъем.

Органы настройки. Ручки переменных резисторов:

1) «демпфер» (R_4) для изменения постоянной времени демпфирования ($T_{дф} = 0,5 \div 10$ с);

2) «зона» (R_{6a}) для изменения зоны нечувствительности регулятора ($\Delta n = 120 \div 180$ мкА);

3) «импульс» (R_{156}) для регулирования времени однократного включения регулятора [$t_n = (1 \pm 0,4)$ с];

4) ручка переключателя $T_n(B_1)$ для изменения постоянной времени интегрирования ($T_n = 5 \div 510$ с; $T_n = 20 \div 2000$ с);

5) ручка переключателя $v_{св}(B_2)$ для изменения скорости обратной связи (степени обратной связи δ или коэффициента усиления регулятора K_p) ($v_{св} = 0,1 \div 2,5$ % УП/С).

Органы контроля. 1. Сигнальные лампы «больше» (красная) и «меньше» (зеленая) — для визуального наблюдения за работой регулятора. 2. Гнезда А—Б — для измерения сигнала рассогласования на входе блока. 3. Гнезда В—Б — для контроля напряжения на входе релейного усилителя (вход усилителя постоянного тока). 4. Гнезда Г—Б — выход главной обратной связи. 5. Гнезда Д—Б — выход местной обратной связи (измерение длительности импульса t_n).

Блок регулирующий аналоговый Р-12 входит в состав аппаратуры автоматических регуляторов в качестве регулирующего блока и применяется как самостоятельный регулятор для управления исполнительными устройствами (позиционерами) или пропорциональными (линейными) усилителями мощности. Другое назначение Р-12 — корректирующий регулятор в многоконтурных схемах регулирования.

Входные токовые сигналы 0—5 и 0—20 мА вводятся в регулирующий блок непосредственно (без масштабирования и без гальванической изоляции) или с выхода измерительного блока типа И-04 (с независимым масштабированием и с гальванической изоляцией). Аналоговый блок Р-12 построен по блочно-модульному принципу в соответствии с функциональной схемой, изображенной на рис. 7.3. Он состоит из следующих элементов, включенных последовательно: узла входных цепей 1; усилителя постоянного тока с высокоомным входом и токовым выходом 2 (УВ-22); модуля ограничения 3; усилителя постоянного тока 4 (УВ-21) с высокоомным раздельным входом и с двумя сигналами на выходе (основным токовым и дополнительным по напряжению, гальванически изолированным от основного). Все элементы, кроме узла входных цепей, снабжаются от одного источника питания 5 и охвачены устройством отрицательной обратной связи, образующей модуль динамики 6.

Узел входных цепей 1 воспринимает токовые сигналы или датчиков напряжения U_d и компенсирует их сигналом задающего устрой-

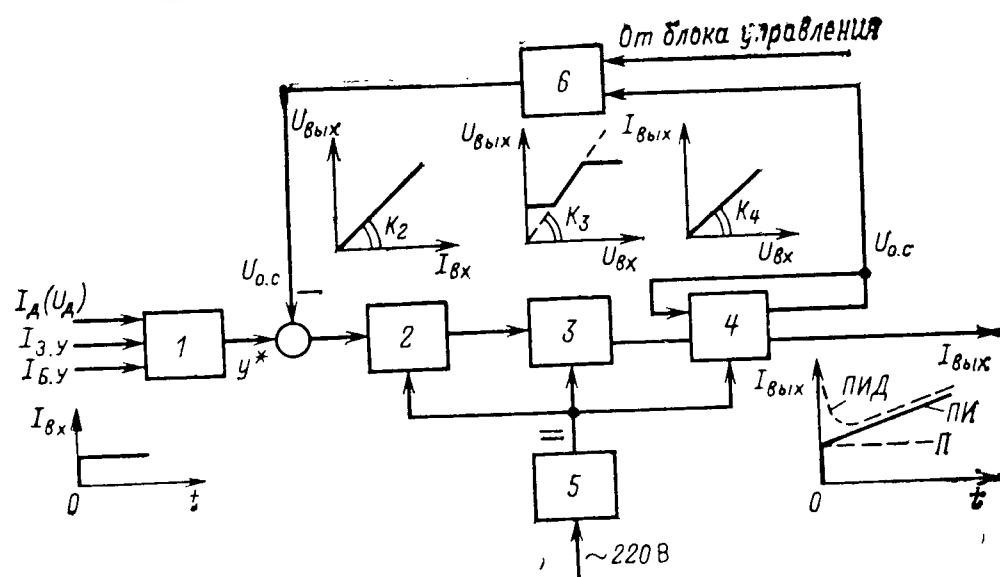


Рис. 7.3. Функциональная схема Р-12

ва (ЗУ) с токовым выходом ($I_{3.y}$). При ручном управлении на вход узла поступает сигнал от блока управления (БУ). На выходе узла формируется сигнал рассогласования y^* по напряжению.

Усилитель постоянного тока 2 (УВ-22) воспринимает разность между сигналом рассогласования y^* и сигналом обратной связи $U_{o.c}$ и усиливает его по напряжению с $K_2 = 1,5 \cdot 10^3$. Модуль ограничения 3 воспринимает сигнал с выхода УВ-22 и передает на вход второго усилителя УВ-21 на активном линейном участке (см. рис. 8.3) с коэффициентом усиления $K_3 = 1$, а на участках ограничения (насыщения) обеспечивает двустороннее регулирование ограничения.

Второй усилитель постоянного тока 4 (УВ-21) воспринимает сигнал с выхода модуля ограничения и передает его на основной токовый выход с крутизной статической характеристики $S_y = 1$ мА/В и на дополнительный выход по напряжению с коэффициентом усиления $K_4 = 1$. Модуль динамики 6 содержит RC-цепи функциональной (главной) обратной связи и цепи, обеспечивающие безударное переключение с ручного управления на автоматическое. Цепи главной обратной связи воспринимают сигнал с дополнительного выхода второго усилителя УВ-21 и формируют сигнал обратной связи $U_{o.c}$, в свою очередь формирующий П-, PI- и ПИД-законы регулирования [последний в соответствии с (3.28)]. Цепи, обеспечивающие безударное переключение, получают управляющее воздействие в виде замыкания или размыкания контакта от блока управления.

7.2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ БЛОК И-04

Измерительный блок И-04 служит для формирования сигнала рассогласования между заданным значением и алгебраической суммой входных токовых сигналов 0—5 мА.

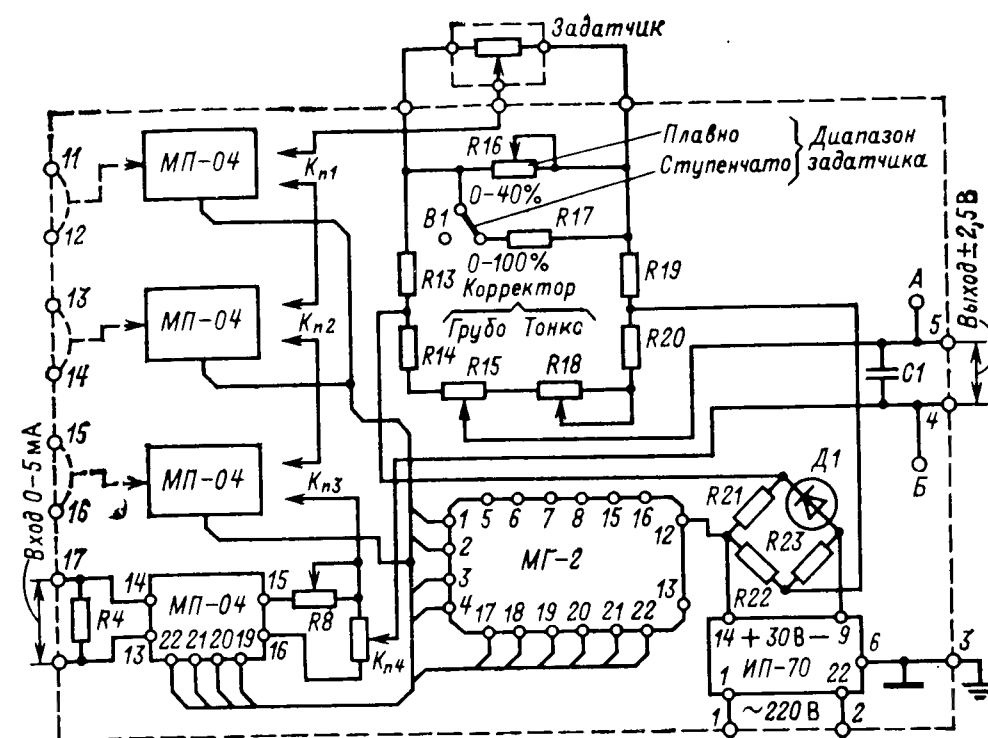


Рис. 7.4. Схема электрических соединений блока И-04

В измерительный блок может быть введено до четырех сигналов с независимым масштабированием и взаимной гальванической изоляцией. Сигнал заданного значения формируется с помощью встроенных в блок корректора и выносного потенциометрического ЗУ. Выходной сигнал блока формируется в виде напряжения постоянного тока; вводится в регулирующие блоки Р-21, Р-12 и другие функциональные блоки системы.

Принципиальная схема электрических соединений блока показана на рис. 7.4. Блок содержит входные цепи (резисторы $R1-R4$), четыре преобразователя сигнала МП-04, генератор напряжения МГ-2, четыре узла масштабирования сигналов, узел компенсации (корректор — задатчик) и источник питания. Сигнал напряжения постоянного тока с входных резисторов поступает на вход преобразователя МП-04, который преобразует и усиливает сигнал. Преобразователь МП-04 представляет собой модулятор и демодулятор, выполненные на триодах и связанные разделительным трансформатором, обеспечивающим гальваническую изоляцию входных цепей от выходных. Питание МП-04 осуществляется от генератора напряжения МГ-2, представляющего собой полупроводниковый преобразователь постоянного напряжения в переменное. Он выполнен на транзисторах. Частота выходного напряжения около 10 кГц. Питание генератора осуществляется от стаби-

лизатора тока Д1. Выходные сигналы снимаются с зажимов 1—8 и 15—22. Выходные сигналы с преобразователей МП-04 поступают на узлы масштабирования, регулирующие значения коэффициентов усиления K_{pi} по каждому из каналов. Далее сигналы всех преобразователей последовательно суммируются, а затем алгебраически складываются с сигналом узла компенсации.

Уравнение статической характеристики блока

$$U_d = \sum_{i=1}^4 K_{pi} I_{вх} - U_{кор} - U_{з.у}, \quad (7.1)$$

где $K_{pi} = R_{вхi} \gamma_i K_i$ — коэффициент усиления (пропорциональности) по каждому каналу ($R_{вхi} K_i = 0 \div 0,5$ В/мА); $U_{кор}$ — сигнал на выходе корректора; $U_{з.у}$ — сигнал на выходе задатчика.

Узел компенсации построен по мостовой схеме. Потенциометры R15 и R18 соответственно служат для «грубой» и «плавной» компенсации. Резисторы R17 и R16 — для ступенчатого и плавного изменения сигнала задания.

Питание моста осуществляется от стабилизатора Д1, питающегося в свою очередь от источника питания ИП-10. Выходной сигнал МП-04 $\pm 2,5$ В снимается с зажимов 4—5.

Органы настройки и контроля:

1) $K_{п1}—K_{п4}$ для установки коэффициентов усиления по каждому из каналов (для совмещения статических характеристик датчиков);

2) переключатель «диапазон задатчика — дискретно» (ступенчато) для установления диапазона действия выносного ЗУ от 0 до 100 % или от 0 до 40 %;

3) ручка потенциометра «диапазон задатчика — плавно» для установки точного значения заданной регулируемой величины;

4) ручка потенциометра «корректор» для установки заданного значения регулируемой величины в измерительном блоке (ручка «грубо» для изменения заданного значения от 0 до 100 % и «плавное» от 0 до 5 %);

5) гнезда А—Б для контроля напряжения на выходе блока.

7.3. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ СОСТАВ АППАРАТУРЫ «КАСКАД-1»

В состав аппаратуры Каскад-1, кроме регулирующих и измерительных блоков, входит ряд вспомогательных и функциональных устройств:

1. Блок суммирования А-04 предназначен для алгебраического суммирования нескольких входных токовых сигналов.

2. Блок ограничения Н-02 (аппаратура ГСП) предназначен для двустороннего ограничения выходного токового сигнала 0—5 мА.

3. Вычислительные блоки — умножения А-31, давления А-32 и извлечения корня А-33.

4. Блок согласующих приставок В-21 предназначен для согласования характеристик выходных цепей и нагрузок релейных регулирующих приборов при наличии в нагрузках индуктивной составляющей сопротивления, например, магнитных усилителей.

5. Блоки управления (БУ) регуляторов предназначены для ручного дистанционного управления регулирующими органами и переключения выходных цепей регулирующего блока с автоматического управления на ручное.

6. Защитные диодные устройства В-01 предназначены для распределения унифицированного сигнала связи нескольким потребителям и защиты от разрыва токовой цепи 0—5 мА при отключении отдельных потребителей путем их шунтирования без искажения нагрузочных характеристик источника сигнала.

7. Блок указателей В-12 предназначен для визуального контроля тока нагрузки аналогового регулирующего прибора или тока датчика положения исполнительного механизма, а также для контроля сигнала рассогласования на входе регулирующих блоков.

Схема внешних соединений главного (аналогового Р-12) и «подчиненного» (релейного Р-21) регуляторов и сопутствующей этому случаю (см. рис. 11.7) измерительной, функциональной и вспомогательной аппаратуры «Каскад» приведена на рис. 7.5.

Перевод Р-21 на автоматическое управление от Р-12 осуществляется с помощью БУ-12 и БУ-21. Перед этим Р-12 балансируется по показаниям блока указателей В-12 задатчиком ручного управления ЗУ-11. После проведения этой операции, тщательно сбалансировав Р-21, можно переводить БУ-21 в положение «автоматика» (А).

Перевод Р-21 на ручное управление осуществляется переключением БУ-12 в положение «Р» («ручное»). В результате «подчиненный» регулятор отключается от «главного» и подсоединяется к регулируемому источнику тока, находящемуся в БУ-12, воздействуя на который оператор вручную устанавливает нужный ток на входе в Р-21, пользуясь указателем тока. При ручном управлении зажимы 5—6 блока Р-12 замыкаются переключателем БУ-12. При этом одна из контактных групп, находящихся в Р-12, подает на его вход сигнал 0—5 мА от блока управления БУ-12 (с зажимов 11—12) и переводит Р-12 в режим П-регулятора с $K_p=1$, а другая подключает к его выходу (зажимы 7—10) резистор фиктивной нагрузки вместо Р-21. В результате выходной сигнал Р-12 непрерывно следит за током на входе Р-21, задаваемым оператором, чем обеспечивается безударное переключение с ручного управления на автоматическое.

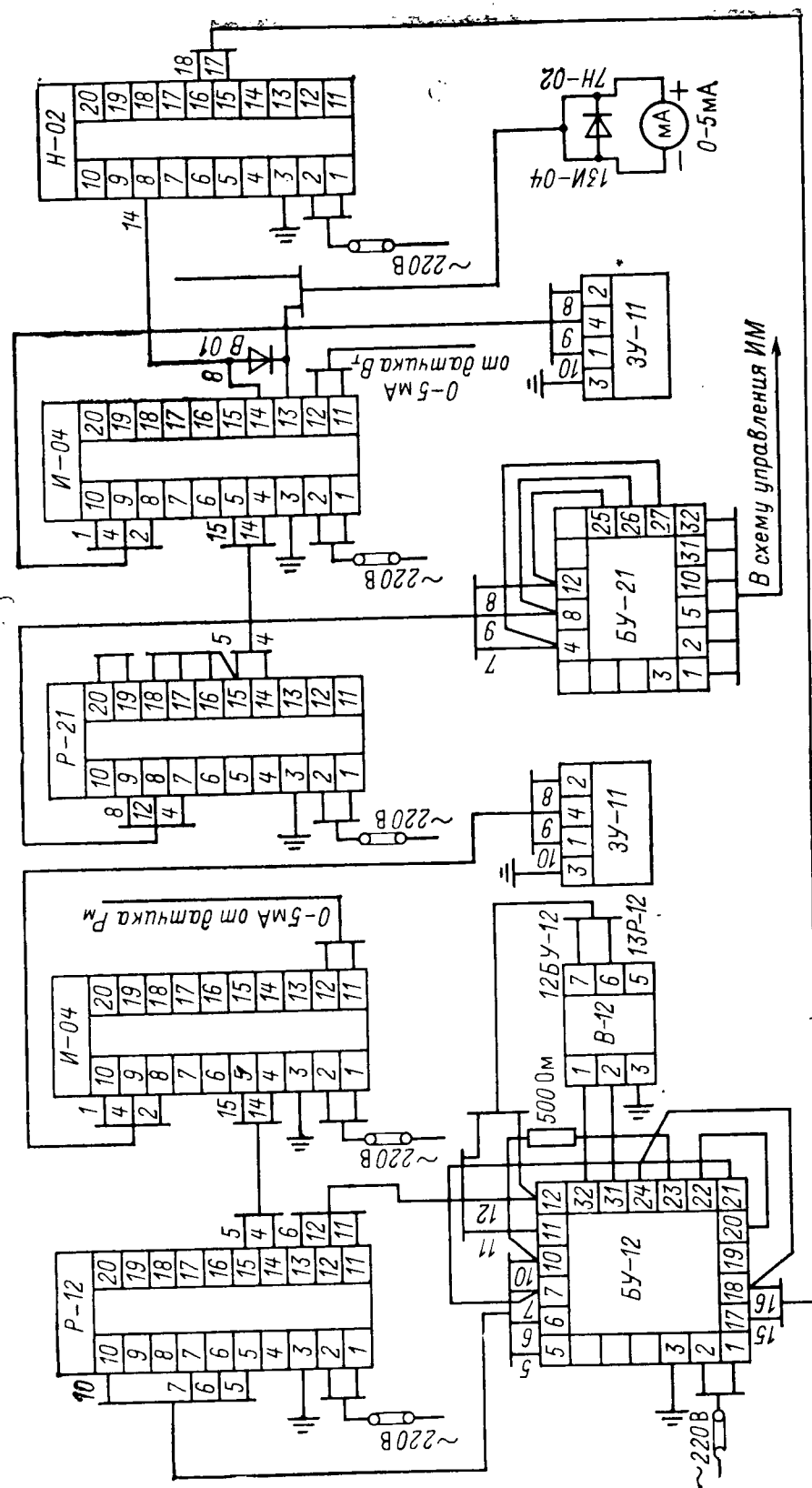


Рис. 7.5. Схема внешних соединений аппаратуры Каскад

7.4. РЕГУЛИРУЮЩАЯ АППАРАТУРА «КАСКАД-2»

Новый комплекс аппаратуры автоматического регулирования «Каскад-2» предназначен для построения одноконтурных и многоконтурных АСР нижнего уровня управления паровых котлов, турбин и вспомогательного оборудования ТЭС и АЭС [9]. В новом комплексе с целью повышения качества и гибкости управления предусматривается расширение функциональных возможностей отдельных приборов. В частности, нелинейное преобразование, выделение максимального или минимального входных сигналов; дистанционное (от ручных задатчиков) и автоматическое (от УВК) воздействие на параметры настройки регулирующих приборов; интегрирование непрерывного и дискретного сигналов с большой постоянной времени и неразрушающейся памятью; размножение сигналов с гальваническим разделением и др. Расширен набор входных сигналов: предусмотрено использование сигналов 4—20 мА, 0—10 В; имеются блоки, позволяющие использовать сигналы, поступающие непосредственно от дифференциально-трансформаторных датчиков, термопар и термометров сопротивления.

Аппаратура Каскад 2 отличается: совмещением измерительного и регулирующего модулей в одном приборе; совмещением логических и вычислительных функций в одном приборе; высокой точностью и надежностью выполняемых операций по преобразованию сигналов.

Регулирующие модули. Предназначены для преобразования сигнала отклонения регулируемой величины в непрерывный или импульсный сигнал в соответствии с заданным законом регулирования.

Модуль P017 (рис. 7.6) обеспечивает: ПИД-регулирование с непрерывным выходным сигналом; регулируемое ограничение верхнего α_v и нижнего α_n уровней выходного сигнала; демпфирование входного сигнала; безударное пе-

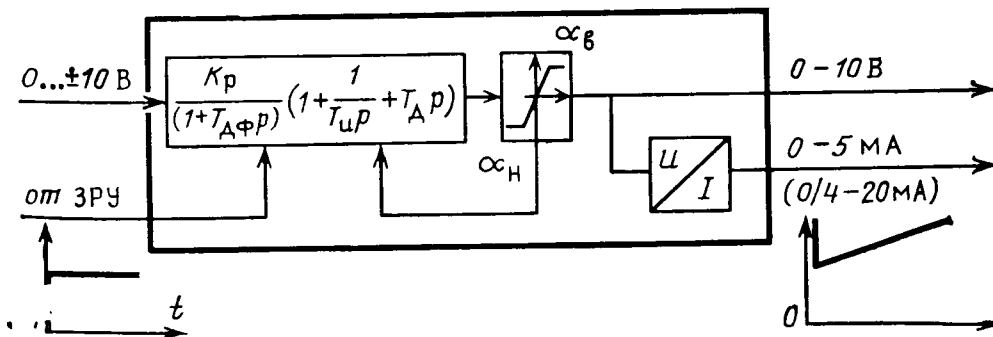


Рис. 7.6. Функциональная схема регулирующего модуля P017

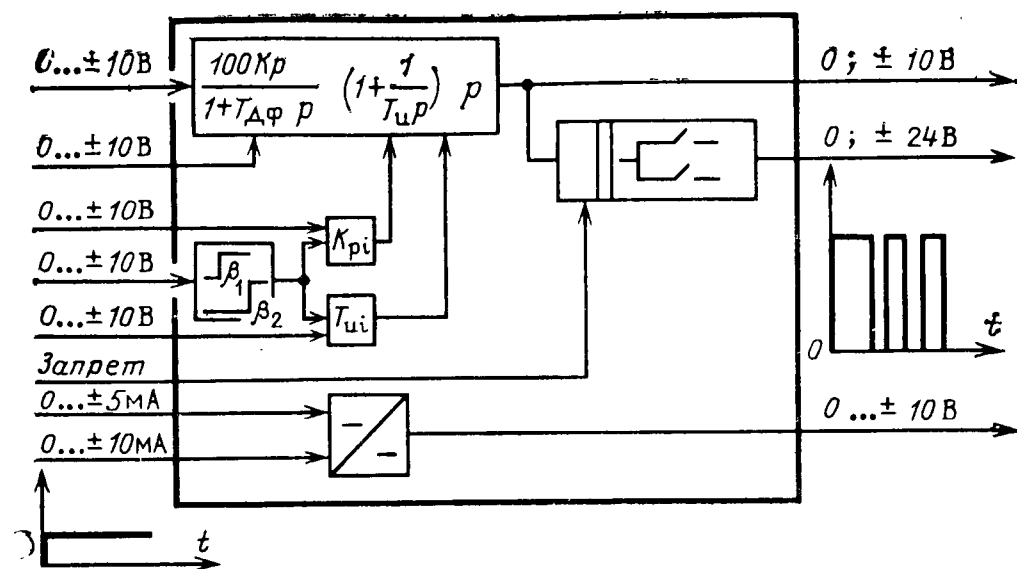


Рис. 7.7. Функциональная схема регулирующего модуля P027

реключение режима ручного управления на автоматическое (в комплекте с внешним блоком управления). Чаще всего используется как главный или корректирующий регулятор в многоконтурных АСР.

Параметры настройки: коэффициент передачи $K_p = 0,3 \div 100$; постоянная интегрирования $T_{ин}$ (для исполнения 1) составляет 20—2000 с (для исполнения 2 и 3 соответственно 5—500 и 0,5—50 с); постоянная демпфирования $T_{дф}$ (для исполнения 1) равна 0—600 с (для исполнения 2 и 3 соответственно 0—100 и 0—10 с); верхний уровень ограничения $\alpha_v = 100—0\%$; нижний уровень ограничения $\alpha_n = 0—100\%$.

Модуль P027 (рис. 7.7) обеспечивает: ПИ-регулирование совместно с последовательно включенным исполнительным механизмом с постоянной скоростью перемещения, движущимся в пульсирующем режиме; демпфирование входного сигнала; гальваническое разделение выходного сигнала; введение запрета на управление; аналоговую или дискретную трехступенчатую, а также аналого-дискретную автоподстройку коэффициента передачи K_p и постоянной интегрирования $T_{ин}$. Предназначен для использования на нижнем уровне управления в качестве основного регулятора в одноконтурной системе с автоподстройкой от УВК или в качестве ведомого регулятора в многоконтурной системе управления с дискретной подстройкой параметров β_1 и β_2 от ручного задатчика или с автоподстройкой от УВК.

Параметры настройки: диапазон подстройки K_p при аналоговой подстройке и на каждой из трех ступеней дискретной подстройки —

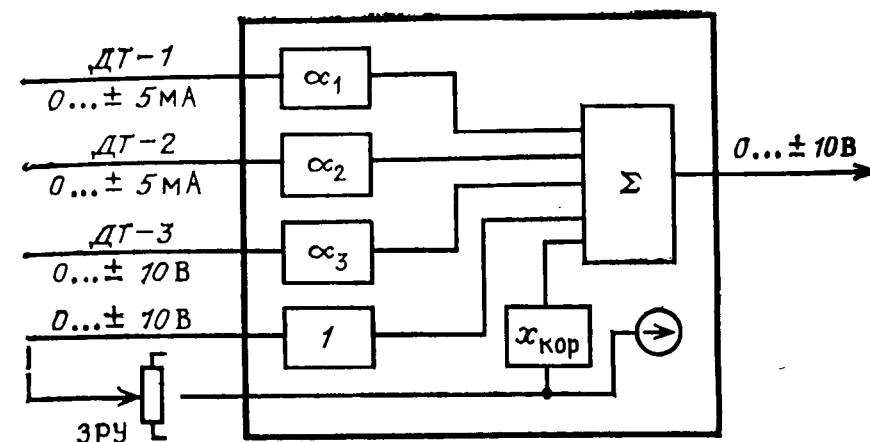


Рис. 7.8. Функциональная схема модуля формирования сигнала отклонения ИД001

1—10 с/%; диапазон подстройки постоянной интегрирования $T_{ин}$ при аналоговой подстройке и на каждой из трех дискретных ступеней (десятикратный в пределах каждой ступени) (для исполнения 1) — 20—200 с (для исполнения 2 — 50—500 с; для исполнения 3—100—1000 с); диапазон изменения порогов при переходе со ступени на ступень при дискретной автоподстройке $\beta_1, \beta_2 = 0 \div 100\%$; постоянная демпфирования $T_{дф} = 0 \div 10$ с; длительность импульсов $\Delta t_{ин} = 0,1 \div 1$ с; зона нечувствительности $\Delta_n = 0,2 \div 2\%$.

Модули формирования сигнала отклонения. В состав аппаратуры «Каскад-2» входит группа модулей, предназначенных для формирования сигнала отклонения, подаваемого на вход регулирующих модулей.

Модуль ИД001 служит для формирования сигнала отклонения с выхода одного, двух или трех дифференциально-трансформаторных первичных преобразователей (датчиков), подаваемого на вход регулирующих модулей P017 и P027, а также модулей статического и динамического преобразования типов Л03 и Д05. Функциональная схема модуля ИД001 изображена на рис. 7.8. Модуль ИД001 обеспечивает: суммирование и масштабирование ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) сигналов от датчиков или сигналов постоянного тока (до трех сигналов), а также введение сигнала заданного значения регулируемой величины от внутреннего ($x_{кор}$) и внешнего потенциометрического задатчиков ручного управления, снабженных стрелочным указателем выходного сигнала.

Модуль ИТ002 (рис. 7.9) служит для формирования сигнала отклонения с выхода термопары (одной из гра-

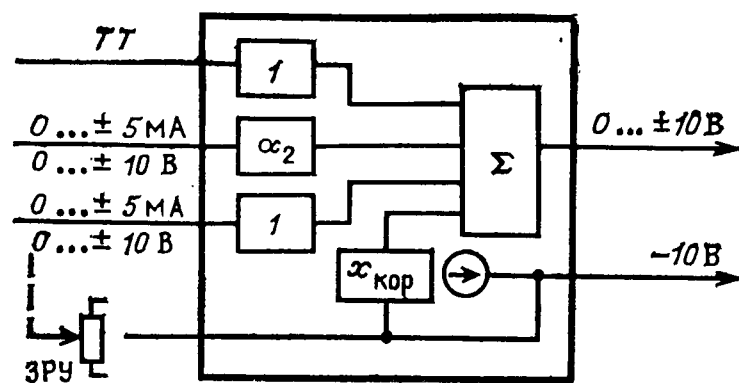


Рис. 7.9. Функциональная схема модуля формирования сигнала отклонения ИТ002

дуировок: ХК, ХА и ПП), подаваемого на вход регулирующих модулей Р017, Р027 и функциональных модулей Л003 и Д005. Модуль ИТ002 обеспечивает: суммирование сигналов от одной термопары и сигналов постоянного тока (до двух входов) с масштабированием одного из них (α_2), а также введение сигнала заданного значения регулируемой величины от внутреннего ($x_{кор}$) и внешнего потенциометрического задатчиков, снабженных стрелочным указателем выхода.

Модуль И001 обеспечивает суммирование и масштабирование с гальваническим разделением до четырех входных сигналов постоянного тока, а также введение заданного значения регулируемой величины от внутреннего и внешнего задатчиков, снабженных стрелочным указателем выхода.

Нелинейность статической характеристики измерительных модулей $U_{вых} = f(I_{вх})$ составляет 0,2 %; дрейф нуля за 100 ч непрерывной эксплуатации составляет 0,05—0,2 %; погрешность компенсации входного сигнала постоянного тока другим входным сигналом постоянного тока зависит от температуры окружающей среды и составляет 0,05 %/10 °С; погрешность компенсации входного сигнала постоянного тока естественным входным сигналом — 0,15 %/10 °С; дрейф нуля в зависимости от температуры окружающей среды составляет 0,05 %/°С для модулей И001 и И00Т2; этот же показатель для модулей ИД001 и ИС001 составляет 0,2 %/10 °С; погрешность, вызванная отклонением напряжения источника питания, для всех типов модулей не превышает 0,2 %; дрейф нуля при воздействиях магнитного поля не превышает 0,05 %.

Модули статического и динамического преобразования сигналов. Модули статического преобразования сигналов

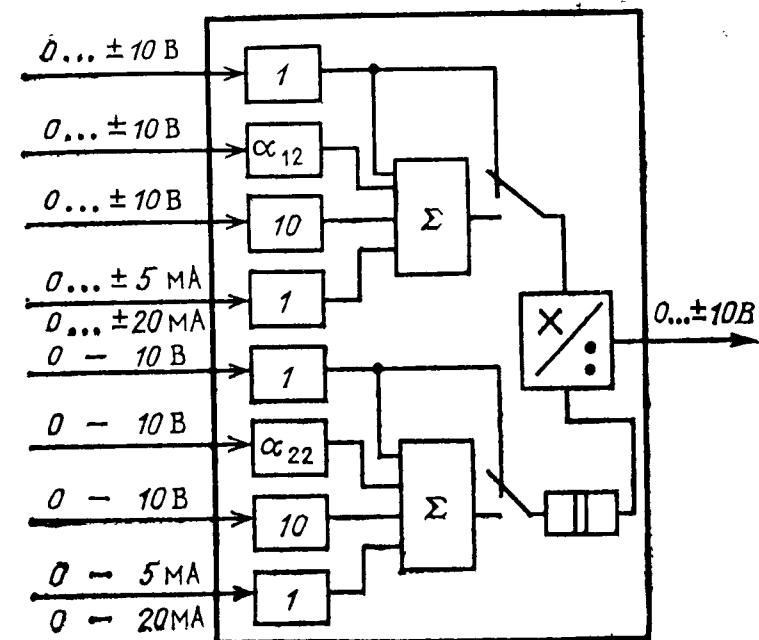


Рис. 7.10. Функциональная схема модуля вычислительных операций А035

предназначены для аналогового (непрерывного) и аналого-дискретного (релейного) преобразования входных сигналов постоянного тока или сигналов с выхода измерительных модулей, а также для выполнения простых вычислительных операций (алгебраическое суммирование, умножение, деление).

Модуль А035 (рис. 7.10) используется как сумматор и функциональный преобразователь сигналов в сложных автоматических системах управления и защиты. Модуль А035 обеспечивает: суммирование до четырех входных токовых сигналов с масштабированием по каждому из двух входов (α_{12} и α_{22}); гальваническое разделение одного из входов перед выполнением какой-либо вычислительной операции; одну из вычислительных операций — умножение, деление, извлечение корня и возведение в квадрат (по выбору) с погрешностью, не превышающей 0,2 %.

Модуль Л003 (рис. 7.11). При работе с измерительными модулями типов ИД001, ИТ002 и А001 может быть использован в системах регулирования, защиты или сигнализации, работающих по соотношению двух сигналов; как устройство управления перемещением двух исполнительных механизмов, связанных с одним регулирующим прибором. Модуль Л003 обеспечивает: аналого-релейное преобразование разности двух входных сигналов по каждому из

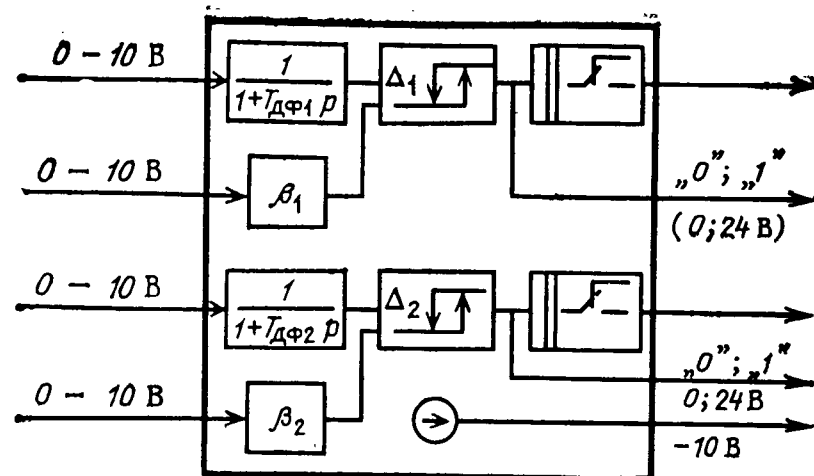


Рис. 7.11. Функциональная схема модуля аналого-релейного преобразования сигналов Л003

двух независимых каналов; демпфирование входных сигналов с постоянной времени демпфирования $T_{дф}=0\div 22$ с. Диапазон изменения порога срабатывания в релейных преобразованиях $\beta_{1,2}=0\div 100\%$, зона возврата статической характеристики релейного элемента (см. рис. 6.12) — $\Delta_{1,2}=0,1\div 5\%$.

В группу модулей статического преобразования сигналов входят также: модуль А001, обеспечивающий суммирование и масштабирование входных токовых сигналов; модуль Н005, обеспечивающий кусочно-линейную аппроксимацию гладкой нелинейной функции одной переменной и выделение максимального или минимального из трех входных сигналов; модуль Ф001, обеспечивающий преобразование сигнала постоянного напряжения в частоту.

Модули динамического преобразования сигналов предназначены для использования в сложных системах управления и сигнализации как устройства формирования скоростных и интегральных составляющих отклонения регулируемых величин. Модуль Д005 обеспечивает динамическое преобразование по каждому из двух независимых каналов в соответствии с аperiodическим, интегральным, дифференциальным законами по выбору [формулы (1.45), (1.63) и (1.76)]; гальваническое разделение и преобразование дискретного входного сигнала 0; 24 В по каждому из двух независимых каналов. Параметры настройки: коэффициент передачи $K_{pi}=0,1\div 10$; постоянная времени $T_i=0,5\div 500$ с; постоянная демпфирования при дифференциальном преобразовании $T_{дфi}=0\div 22$ с.

В группу модулей динамического преобразования входят также: модуль Д006, обеспечивающий дифференцирование и интегрирование входного сигнала с аналоговой или дискретной подстройкой коэффи-

циента передачи K_{pi} и постоянной времени T_i ; модуль Д007, обеспечивающий интегрирование частотного сигнала с последующим цифро-аналоговым преобразованием; принудительное быстрое или медленное изменение выходного сигнала по интегральному закону; двустороннее ограничение сигнала с введением команд запрета ограничения; хранение и восстановление информации после перерыва в питании от источника. Последние применяются в сложных системах автоматического регулирования или логического управления, описание которых приводится ниже.

В качестве элементной базы модулей используются операционные усилители постоянного тока, построенные на интегральных микросхемах К140УД7 и К140УД8.

7.5. РЕГУЛИРУЮЩИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ БЛОКИ «КАСКАД-2»

Каждый блок образуют два функциональных модуля и модуль источника питания, объединенные в одном корпусе. Тип блока определяется типом входящих в него модулей, выполняющих основную функцию. Так, регулирующие блоки выпускаются на базе регулирующих модулей, функциональные — на базе модулей статического и динамического преобразования сигналов. Существуют различные модификации одного и того же блока в зависимости от вида модуля, выполняющего вспомогательную функцию, связанную с формированием или преобразованием входного сигнала. Например, блок регулирующий аналоговый с импульсным выходным сигналом, выпускаемый на базе основного модуля Р027, имеет четыре модификации в зависимости от типа вспомогательного модуля, формирующего сигнал отклонения: 1) Р27 — с входным модулем И001; 2) Р27.1 — с входным модулем ИД001; 3) Р27.2 — с входным модулем ИС001; 4) Р27.3 — с входным модулем ИТ002.

Аналогичные модификации имеет регулирующий блок Р17 с непрерывным выходным сигналом.

Функциональные блоки модифицируются по такому же принципу. Так, например, блок аналого-релейного преобразования Л03 имеет при модификации: 1) Л03 — с входным модулем А001; 2) Л03.1 — с входным модулем ИД001; 3) Л03.2 — с входным модулем ИТ002. Аналогичные модификации имеет блок динамического преобразования Д05. Блок нелинейного преобразования Н05 выпускается в сочетании с входным модулем А001; блок интегрирования Д07 — в сочетании с входным модулем Ф001, обеспечи-

вающим частотное преобразование входного сигнала или суммирование и масштабирование двух сигналов постоянного тока.

Для увеличения гибкости управления в случае создания сложных систем все входы и выходы каждого модуля (за исключением частотного сигнала модуля Д007) выведены на общий сборник каждого блока. Это позволяет применять модули, входящие в один блок, независимо друг от друга.

Общим для всех блоков является модуль источника питания типа ИПС01, формирующий на своем выходе стабилизированное напряжение ± 15 В и нестабилизированное напряжение +27 В относительно общей точки для питания двух функциональных модулей блока.

Конструктивное исполнение блоков полностью унифицировано. Все блоки выполнены в виде металлического шасси, вставляемого в сварной корпус, одинаковый по размерам для всех блоков: 60 (ширина) $\times$ 160 (высота) $\times$ 500 (длина) мм. На задней стенке блока корпуса установлена колодка зажимов, имеющая 30 винтовых зажимов для подключения внешних приборов. Органы настройки и контрольные гнезда для подсоединения измерительной аппаратуры размещены на боковых панелях функциональных модулей. Доступ к ним возможен при частичном выдвигании шасси из корпуса без нарушения электрических соединений. Для этого связь шасси с колодкой зажимов на корпусе осуществляется гибким ленточным проводником со штепсельным разъемом. Электрическое питание 220 В переменного тока, потребляемая мощность 15 В·А, масса не более 5 кг. Условия эксплуатации: температура окружающего воздуха 5—50 °С; относительная влажность при отсутствии примесей агрессивных газов 30—80 %; допустимая вибрация по частоте 5—50 Гц, по амплитуде 0,02—11 мм.

Контрольные вопросы

1. В чем состоят преимущества использования унифицированного сигнала связи?
2. Как работает релейно-импульсный регулятор с блоком Р-21?
3. Поясните, пользуясь рис. 7.11, в чем состоит назначение регулирующего модуля Р017?
4. Приведите пример модуля формирования сигнала отклонения в аппаратуре Каскад 2.
5. Назовите модули статического преобразования сигналов: каковы их функции? Какую погрешность преобразования они имеют?
6. В чем назначение модулей динамического преобразования сигналов аппаратуры Каскад 2?

Глава восьмая

АГРЕГАТИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

8.1. РЕГУЛИРУЮЩИЕ БЛОКИ АКЭСР 1

Агрегатированный комплекс электрических средств регулирования первой очереди (АКЭСР 1) характеризуется использованием интегральных микросхем общего и специального назначения и повышенной функциональной насыщенностью отдельных блоков [10]. Другое существенное отличие этой аппаратуры состоит в возможности дискретного или аналогового изменения параметров динамической настройки регулирующих блоков. Данная особенность в сочетании с функциональными блоками позволяет осуществлять связь регулирующих блоков с централизованным управляющим вычислительным комплексом. Кроме того, с целью повышения помехозащищенности и надежности аппаратуры АКЭСР 1 внешние информационные и управляющие сигналы вводятся через блоки гальванического разделения электрических цепей. Все блоки АКЭСР 1 выпускаются как в индивидуальном, так и в шкафном (П и Ш) исполнениях. Шкафной тип исполнения АКЭСР 1 позволяет существенно уменьшить размеры приборных панелей, занимаемых регулируемыми и функциональными блоками АКЭСР 1 на блочных щитах управления.

Регулирующий блок РБИ. Функциональная схема РБИ (без цепей дистанционного изменения параметров настройки), изображенная на рис. 8.1, соответствует структуре промышленного регулятора с нелинейным элементом в прямом канале усиления, охваченном отрицательной обратной связью (см. рис. 6.12). Функциональную схему РБИ образуют суммирующий каскад (СК), релейный элемент (РЭ) и функциональная обратная связь (ФОС).

На структурной схеме показаны также: блоки масштабирования БМ1 — БМ3, узел формирования сигнала расогласования (ФСР), временной RC-фильтр (Ф), усилитель мощности (УМ) и формирователь напряжения (ФН) для обратной связи.

Узел ФСР выполнен на сумматорах Σ_1 , Σ_2 и Σ_3 . Он осуществляет вычисление ошибки регулирования по формулам:

$$Y_1^* = -(Y_{11} + Y_{12}); \quad Y_2^* = -(Y_{21} + Y_{22} + Y_{23}); \quad (8.1)$$

$$\epsilon_{\Phi} = Y_3^* = Y_1^* - Y_2^*. \quad (8.2)$$



Релейный элемент, так же как и на схеме 6.13, реализует характеристику трехпозиционного реле с зоной нечувствительности Δ и зоной возврата $\Delta_{\text{в}}$. РЭ выполнен на операционных усилителях ОУ5 (канал «меньше») и ОУ6 (канал «больше»), построенных на интегральных микросхемах типа К153УД1А.

Работа регулирующего блока РБИ в целом протекает в соответствии с принципом действия релейно-импульсного регулятора, описанного в § 6.3. При появлении сигнала рассогласования $\epsilon(t) = y^*_1 - y^*_2$ регулирующий блок формирует на своем выходе последовательность прямоугольных импульсов. При этом перемещение регулирую-

щего органа $x_p(t)$ приближается к ПИ-закону регулирования:

$$x_p(t) = K_p \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^t \varepsilon(t) dt \right]. \quad (8.3)$$

Коэффициент усиления K_p релейно-импульсного ПИ-регулятора определяется скоростью заряда цепи обратной связи (скоростью связи $v_{\text{св}}$)

$$K_p = S/v_{\text{св}}, \quad (8.4)$$

где S — скорость перемещения исполнительного механизма.

Постоянная времени интегрирования $T_{\text{и}}$ численно равна постоянной времени разряда

$$T_{\text{и}} = T_p = R_p C_{\text{о.с.}} \quad (8.5)$$

Длительность отдельных включений исполнительного механизма $t_{\text{и}}$ регулируется с помощью переменного резистора $R_{\text{и}}$. Напряжение с выхода $R_{\text{и}}$ подается на сумматор Σ_4 в качестве сигнала положительной обратной связи (ПОС). Последний определяет значение $\Delta_{\text{в}}$, влияющее на отключения релейного элемента.

Регулирующий блок аналоговый РБА. Блок (рис. 8.2) предназначен для формирования входного сигнала рассогласования и его динамического преобразования в выходной аналоговый (непрерывный) сигнал в соответствии с П-, ПД-, ПИ- или ПИД-законами регулирования. В целях

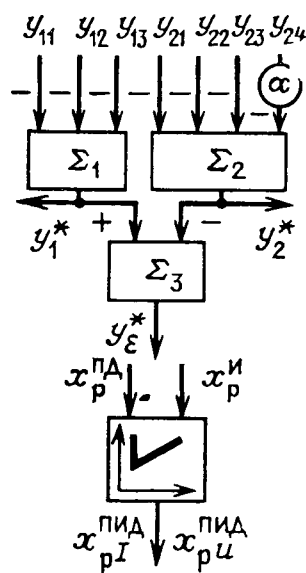


Рис. 8.2. Регулирующий блок с аналоговым сигналом на выходе РБА

повышения надежности АСР в блоке предусматривается ограничение выходного сигнала по верхнему или нижнему уровню, а также кондуктивное разделение входных и выходных цепей. В целях повышения гибкости управления блок обеспечивает безударное переключение с режима ручного (дистанционного) управления на автоматический и обратно. С этой же целью блок РБА имеет пять входов для аналоговых сигналов по напряжению и два по току, один выход по напряжению и один по току. Дистанционное изменение значений параметров настройки РБА осуществляется специальными модулями, подключаемыми к цепям ФОС.

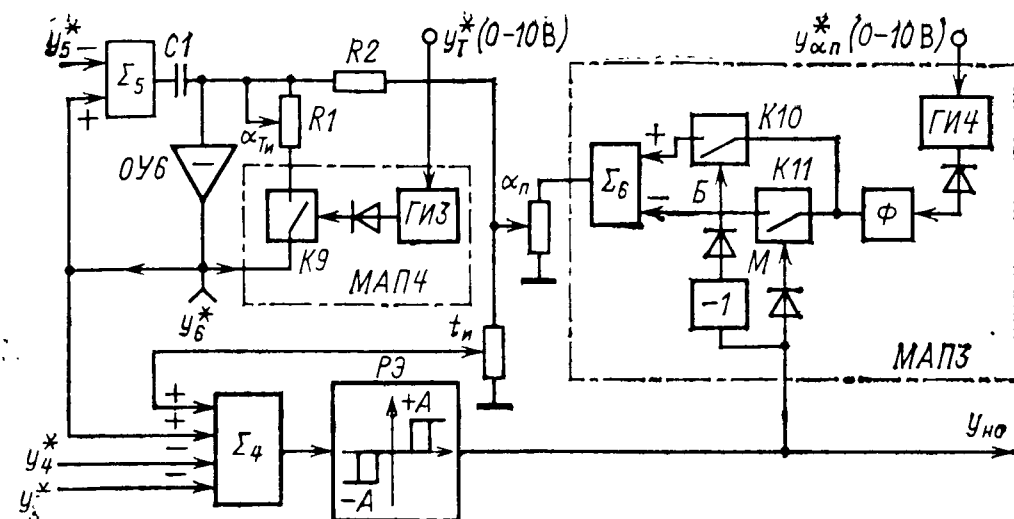


Рис. 8.3. Функциональная схема аналоговой дистанционной настройки параметров в регулирующих блоках РБИМ

В качестве примера рассмотрим аналоговую (плавную) подстройку коэффициента усиления ПИ-регулятора $K_p(\alpha_{\text{п}})$ с помощью модуля МАП-3, который изображен на рис. 8.3.

Сигнал настройки $y_{\alpha_{\text{п}}}^*$, изменяющийся в диапазоне 0—10 В, подается с выхода дистанционного задатчика настройки на вход генератора импульсов ГИ4. На его выходе формируется последовательность импульсов напряжения с амплитудой 10 В, изменяющихся по закону

$$\gamma_{\alpha_{\text{п}}} = 1/(1 + 0,9y_{\alpha_{\text{п}}}^*), \quad (8.6)$$

где $\gamma_{\alpha_{\text{п}}}$ — скважность импульсов, равная отношению времени длительности импульса $\frac{t_{\text{и}}}{T}$ (T — время работы РБИ в режиме подстройки).

Сигнал с выхода ГИ4 поступает на вход фильтра Φ .

На выходе Φ выделяется составляющая однополярного (отрицательного) сигнала импульсной формы, усредненное значение которой $U = \frac{-10}{1 + 0,9y_{\alpha_{\text{п}}}^*}$. Далее сигнал поступает на вход аperiodического звена цепи функциональной обратной связи регулирующего блока через ключ $K10$ (или через ключ $K11$) и сумматор Σ_6 .

Полярность сигнала на выходе сумматора Σ_6 совпадает с полярностью сигнала $y_{\text{н.о}}$ на выходе релейного элемента РЭ. Это достигается тем, что при положительном знаке $y_{\text{н.о}}$ замыкается ключ $K11$ и выход фильтра соединяется с инвертирующим (изменяющим знак сигнала с «+» на «—») входом сумматора Σ_6 , а при отрицательном—

закрывается ключ K_{10} и выход фильтра подключается к инвертирующему входу Σ_6 .

Из выражения (8.6) следует, что напряжение, подаваемое на вход ФОС через резистор, α_n , и, следовательно, скорость связи $v_{св}$ будет обратно пропорциональна сигналу y_{α_n} . С другой стороны, коэффициент пропорциональности регулирующего блока $K_p(\alpha_n)$ есть величина, обратная по отношению к $v_{св}$ [см. (8.4)]. Тогда зависимость между α_n и y_{α_n} оказывается линейной;

$$\alpha_n = \alpha_{по} (1 + 0,9 y_{\alpha_n}), \quad (8.7)$$

где $\alpha_{по}$ — значение коэффициента пропорциональности, устанавливаемое по шкале делителя α_n .

Коэффициент пропорциональности α_n линейно возрастает от 0 до 10 В при изменении аналогового сигнала настройки $y_{\alpha_n}^*$ в том же диапазоне от 0 до 10 В.

Дистанционная аналоговая подстройка постоянной времени интегрирования T_n производится с помощью модуля МАП-4. Аналоговый сигнал настройки, изменяющийся в диапазоне 0—10 В, поступает на вход генератора ГИЗ. На его выходе при этом формируется последовательность импульсов с амплитудой 10 В и скважностью, изменяющейся по закону

$$\gamma_T = 1/(1 + 0,9 y_T),$$

где y_T — сигнал аналоговой дистанционной настройки T_n . Сигнал y_T управляет ключом K_9 , прерывающим в паузах между импульсами цепь отрицательной обратной связи операционного усилителя ОУ6, что приводит к возрастанию постоянной времени интегрирования T_n обратно пропорционально скважности импульсов γ_T (8.7). Тогда зависимость между α_T и y_T оказывается линейной: $T_n = T_{н0}(1 + 0,9 y_T)$, где $T_{н0}$ — значение постоянной времени интегрирования ПИ-регулятора, установленное по шкале ручки настройки $\alpha_{Tн}$.

При изменении аналогового сигнала настройки y_T в диапазоне от 0 до 10 В постоянная времени интегрирования также линейно возрастает от $T_{н0}$ до $10 T_{н0}$.

8.2. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ СОСТАВ АППАРАТУРЫ АКЭСР 1

Блок кондуктивного разделения (БКР) цепей предназначен для ввода и вывода информационных сигналов АСР. Блок обеспечивает: преобразование токового сигнала (0—5; 0—20; 4—20 мА) в сигнал напряжения (0—10 В); гальваническое разделение входных и выходных цепей; демпфирование или дифференцирование непрерывных сигналов с помощью апериодического или реального дифференцирующего звена (см. § 1.5) с постоянной времени $T = 0 \div 24$ с, с коэффициентом усиления $K_y = 0,5 \div 24$.

Блок вычислительных операций БВО1 обеспечивает выполнение любого из следующих действий: умножение двух сигналов, возведения в квадрат, деления двух сигналов, извлечения квадратного корня. В блоке БВО имеется также один свободный делитель напряжения для масштабирования любого из входных сигналов (по напряжению) в пределах от 0 до 1.

Блок сигнализации БСГ имеет два входных канала. В каждом из них содержится сумматор на два входа с масштабированием одного из них и умножением суммы на коэффициент $K = 0,5; 1$ или 5 , а также двухпозиционный релейный элемент (нуль-орган) с настраиваемой зоной возврата Δ_v . Выходной сигнал — логический, т. е. имеет два значения: 0 и 1. Они выдаются с помощью двух выходных контактов реле и одного тиристорного ключа. Блок позволяет реализовать двухпозиционную релейную характеристику с зоной возврата по двум независимым каналам или трехпозиционную релейную характеристику с зоной нечувствительности и зоной возврата для одного канала (см. рис. 6.12).

Блок нелинейных преобразований БНП1 реализует нелинейную зависимость выходного сигнала от входного $y^* = f(y)$ кусочно-линейной аппроксимацией из шести участков и обеспечивает суммирование двух сигналов с масштабированием одного из них.

Блок селектирования БСЛ1 имеет общее число входов 12, 4 из которых масштабируются. Блок содержит четыре сумматора с умножением на постоянный коэффициент. На выходе сумматоров установлены диоды. Данная структура блока обеспечивает: получение четырех линейных комбинаций из двенадцати входных сигналов; выделение наибольшего (наименьшего) сигнала из четырех (трех) линейных комбинаций входных сигналов с сигнализацией выделенного канала; воспроизведение простейших нелинейных зависимостей (ограничение, зона нечувствительности и др.).

Блок прецизионного интегрирования БПИ осуществляет преобразование дискретного сигнала в аналоговый и интегрирование аналогового сигнала с сохранением информации при перерывах питания.

Блок динамических преобразований БДП содержит интегратор с логическим управлением, двухпредельной сигнализацией и ограничением выходного сигнала. Кроме того, блок содержит сумматор на три входа, два из которых масштабируются. Наличие сумматора и интегратора позволяет также реализовать апериодическое и реальное дифференцирующее звено путем встречно-параллельного соединения имеющегося набора звеньев [см. формулу (1.92) и рис. 1.2, а].

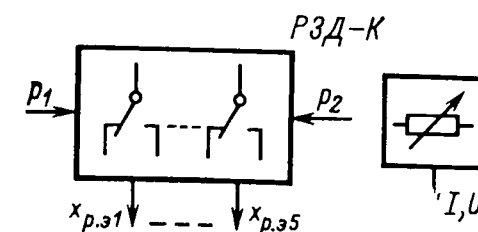


Рис. 8.4. Ручной задатчик РЗД-К

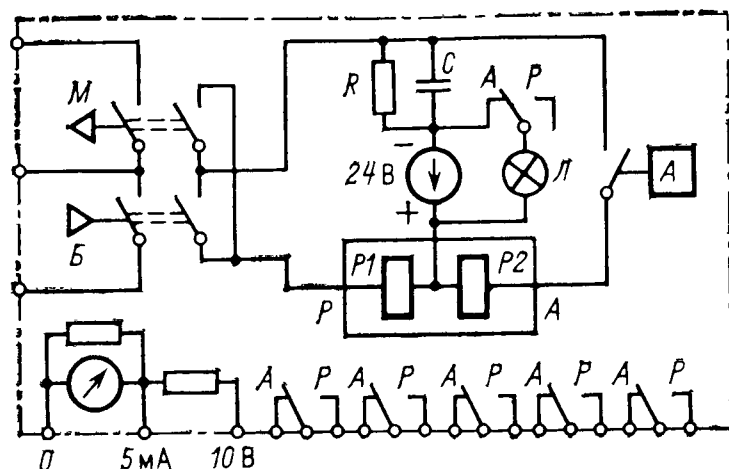


Рис. 8.5. Блок управления БРУ-У

Ручные задатчики (РЗД) (рис. 8.4) обеспечивают ручную установку задания регулирующим или аналоговым исполнительным устройствам в виде унифицированного аналогового сигнала по току (0—5; 0—20; 4—20 мА) или по напряжению (0—10 В). Задатчик типа РЗД-К (кнопочный) дополнительно содержит дистанционный переключатель на два положения с импульсным управлением, а также кнопку для ручной установки переключателя в одно из положений. Одна из функций задатчика РЗД-К — резервирование аналогового регулирующего блока РБА при длительном переводе объекта на ручное управление.

Блоки управления с встроенным указателем типа БРУ-У (рис. 8.5). Блок имеет три кнопки: кнопка А — включение автоматического режима; кнопка М — ручное управление в сторону «меньше»; кнопка В — ручное управление в сторону «больше».

Для перевода БРУ-У из режима ручного дистанционного управления в автоматический достаточно кратковременно нажать кнопку А; при этом через обмотку Р2 двухобмоточного реле протекает ток, возникающий при заряде конденсатора С, и реле переходит в состояние А (рис. 8.5). Одновременно загорается индикаторная лампочка Л, цепь которой замыкается одной из групп контактов реле.

Для перевода в режим ручного управления надо кратковременно нажать одну из кнопок < («меньше») или > («больше»). Возникший ток разряда пройдет через обмотку Р1 двухобмоточного реле, в результате чего реле переводится в состояние Р, а индикаторная лампочка Л гаснет. Другие контакты указанной кнопки, а также свободные контакты двухобмоточного реле используются в цепи управления пусковым устройством исполнительного механизма.

Достоинством описанного способа управления блоками БРУ служит возможность осуществления автоматических переключений в системе (например, по команде какого-либо логического устройства

или УВК), без вмешательства оператора. Блок управления типа БРУ-У имеет встроенный указатель, рассчитанный на токовый сигнал 0—5 мА и на сигнал напряжения 0—10 В. Указатель используется для индикации сигнала на выходе регулирующего блока РБА, функциональных блоков БПИ и БДП, а также для индикации положения регулирующего органа по сигналу от соответствующего датчика исполнительного механизма.

8.3. РЕГУЛИРУЮЩИЕ ПРИБОРЫ АКЭСР 2

Агрегатированный комплекс электрических средств регулирования в микроэлектронном исполнении второй очереди (АКЭСР 2) служит развитием электрических средств регулирования в направлении сокращения общей численности элементов и связей между ними. Наряду с этим новая аппаратура при меньшей стоимости отличается рядом оригинальных решений, ведущих к повышению надежности и ремонтпригодности (разработка НИИ Теплоприбор, СКБ СПА Минприбор СССР, ВТИ им. Ф. Э. Дзержинского).

Регулирующие, функциональные и вспомогательные блоки АКЭСР 2, обладая должной полнотой функций по преобразованию управляющих и информационных сигналов на нижнем уровне АСУ ТП ТЭС, имеют возможность сопряжения с ее логическими, защитными и вычислительными подсистемами [11].

Регулирующие приборы РП4. В составе аппаратуры АКЭСР 2 предусмотрены три исполнения регулирующих приборов. Первое (базовое) исполнение РП4-У рассчитано на работу с четырьмя входными унифицированными сигналами постоянного тока 0—5 мА (в модификации 0—20 мА).

Для прямого подключения термометров сопротивления и термопар к регулирующему прибору предусматривается его второе исполнение РП4-Т, а для подключения дифференциально-трансформаторных, индукционных и ферродинамических — третье исполнение РП4-П. Последние два отличаются от базового прибора РП4-У входным устройством.

На рис. 8.6 приводится упрощенная схема электрических соединений функциональных узлов (модулей) базового исполнения регулирующего прибора.

Входным служит узел суммирования и гальванического разделения электрических цепей (УСГР). Его назначение — одновременный прием, алгебраическое суммирование, масштабирование (изменение чувствительности) и гальваническое разделение для четырех входных унифицированных сигналов. Чувствительным элементом и первичным

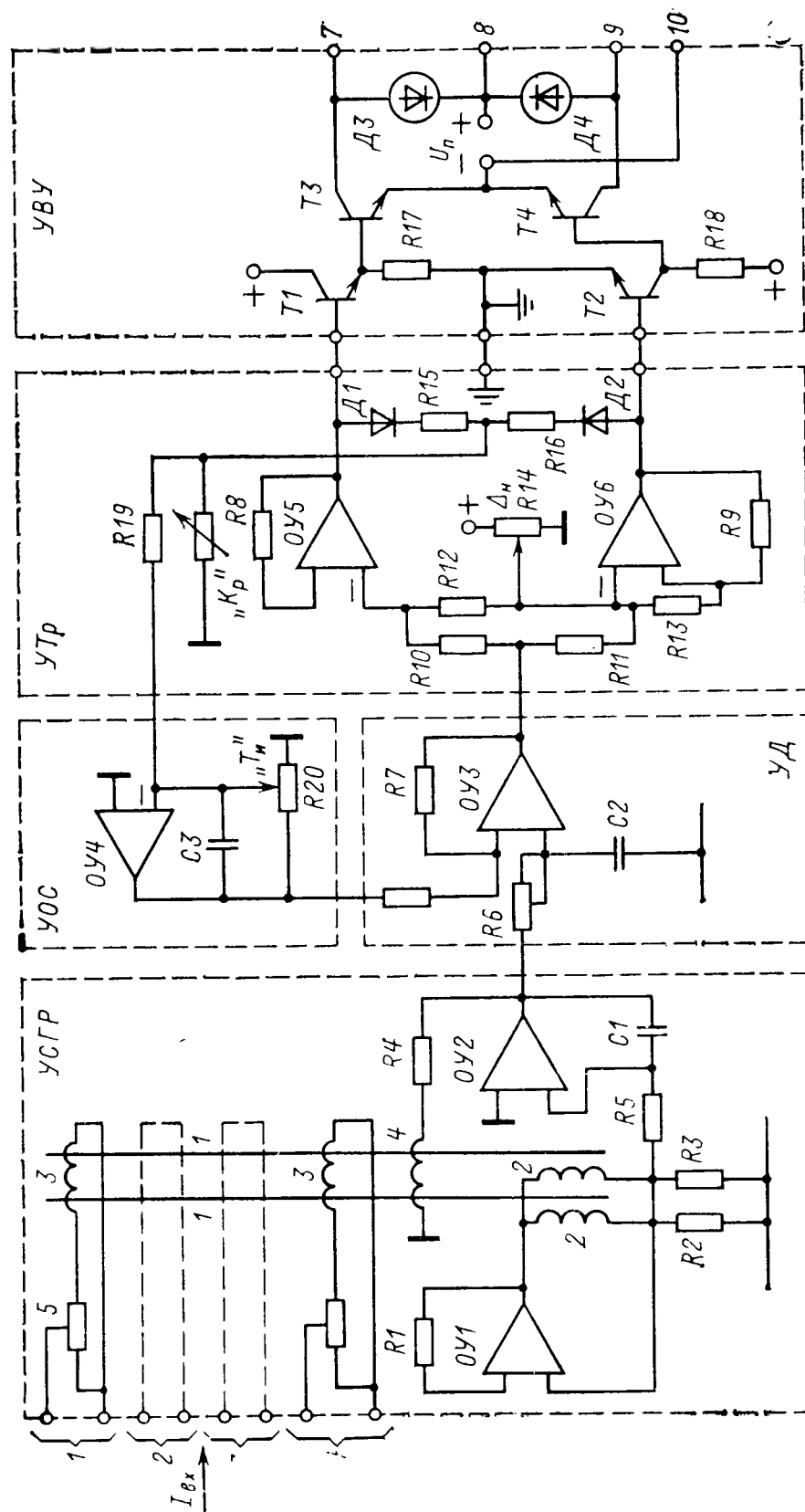


Рис. 8.6. Упрощенная схема электрических соединений РП-4У

преобразователем сигнала служит миниатюрный магнитный усилитель с двумя одинаковыми стержнями 1, каждый из которых снабжается собственной обмоткой возбуждения 2. Оба стержня, один из которых играет вспомогательную роль по компенсации наводок переменного тока во входные внешние цепи прибора, нагружены четырьмя обмотками управления 3 (по числу входных сигналов) и одной обмоткой обратной связи 4. Изменение чувствительности прибора к каждому из вводимых сигналов (масштабирование) осуществляется с помощью делителей тока 5.

Назначение операционного усилителя ОУ1 — генерация тока в обмотках возбуждения 2. При этом усилитель охватывается положительной (через резистор $R1$) и отрицательной (через резистор $R2$) обратными связями (ПОС и ООС). Первая из них (ПОС) действует мгновенно, вторая (ООС) — с инерционностью, обусловленной индуктивностью L обмотки возбуждения. В результате при подключении источника питания на выходе ОУ1 возникают автоколебания с напряжением прямоугольной формы. Симметричность этих колебаний относительно среднего значения устанавливается при начальной настройке ОУ1.

Назначение второго операционного усилителя ОУ2, охваченного отрицательной обратной связью через конденсатор $C1$ и представляющего собой активный фильтр, состоит в том, чтобы выделять среднее значение сигнала с выхода ОУ1. Постоянная составляющая сигнала, снимаемая с выхода активного фильтра, поступает на вход следующего узла. Кроме того, некоторая доля выходного сигнала, ограничиваемая резистором $R4$, вновь поступает на вход магнитного усилителя через обмотку отрицательной обратной связи 4, обеспечивающей стабилизацию общего коэффициента усиления входного узла.

Второй по ходу сигнала узел демпфирования (УД) служит для подавления пульсаций, которые возникают как на объекте, так и в импульсных соединительных линиях измерительного устройства. Так же как и в ранее описанных измерительных блоках, УД выполнен в виде пассивной RC-цепочки с переменным резистором $R6$, подключенным ко входу ОУ3, охваченным стабилизирующей обратной связью через резистор $R7$.

Следующий — узел триггеров (УТр) состоит из одинаковых по своим параметрам операционных усилителей ОУ5 и ОУ6. Его назначение — формирование статической характеристики нелинейного трехпозиционного элемента (см. рис. 6.12).

Зона возврата Δ_v обеспечивается наличием положительной обратной связи через резисторы $R8$ и $R9$, охватывающие соответственно ОУ5 и ОУ6, зона нечувствительности Δ_n — ограничивающими резисторами $R10$, $R11$ и переменным резистором $R14$.

Узел триггеров управляет работой транзисторных усилителей мощности узла выходных усилителей (УВУ). Исходному состоянию триг-

геров (отсутствию командных сигналов) соответствует закрытое состояние выходных ключей. Появление входного сигнала определенной полярности ($y^* > \Delta_n/2$ на рис. 6.12) вызывает открытие соответствующего выходного плеча и как следствие — появление управляющего сигнала постоянного напряжения 24 В на выходе регулирующего прибора (зажимы 7—8—9), сопровождаемого свечением индикаторного светодиода (ДЗ или Д4). При работе прибора в условиях эксплуатации в случае необходимости может быть использован внешний источник питания, подключаемый к зажимам 8—10.

Типовой закон регулирования (3.22), так же как и в функциональной схеме, изображенной на рис. 6.13, обеспечивается узлом отрицательной обратной связи (УОС). В соответствии с типовым решением выходы триггеров, выполняющих функции трехпозиционного реле, соединяются через инерционную обратную связь со входом прибора. При этом сигнал с выхода триггеров поступает на вход УОС через однонаправленный диодно-резисторный делитель (Д1, Д2, R12, R13), чем достигается изменчивость знаков входного сигнала УОС в зависимости от того, какой триггер (верхний ОУ5 или нижний ОУ6) находится в возбужденном состоянии.

Апериодический закон изменения выходного сигнала УОС обеспечивается с помощью высокоомного операционного усилителя ОУ4, охваченного цепочкой отрицательной обратной связи, содержащей конденсатор СЗ и резистор $T_n(R20)$. При реализации ПИ-закона регулирования постоянная интегрирования T_n определяется степенью ввода переменного резистора R20, а коэффициент усиления регулятора K_p — соответствующим переменным резистором, установленным на входе в ОУ4. Основные технические данные представлены ниже:

Число входных масштабируемых сигналов постоянного тока	4
Число дискретных выходов	2 («больше» — меньше)
Пределы изменений зоны нечувствительности	$\Delta_n = 0,2 \div 2\%$
Длительность импульса	$t_n = 0,1 \div 1$ с
Диапазон действия встроенного задатчика	0—100%
Диапазон изменения	$\alpha_k(K_p) = 0,5 \div 5$ с/%
Диапазон изменения	$T_n = 5 \div 500$ (2000) с
Постоянная времени узла демпфирования	$T_\phi = 0,5 \div 30$ с

8.4. СОСТАВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ АКЭСР 2

Функциональные блоки в сочетании с регулирующими приборами и подсистемами АСУ ТП ТЭС существенно расширяют возможности аппаратуры АКЭСР 2 по составлению многоконтурных и «гибких» схем регулирования с охватом многообразия режимов работы энергоблоков (пуски из холодного и горячего состояний, работы при пониженных нагрузках, частые изменения нагрузки и др.).

Функциональные блоки по своему назначению разделяются на три группы: 1) динамического преобразования входных сигналов; 2) статического преобразования сигналов; 3) вспомогательные.

Блоки динамических преобразований. Блок динамической связи (БДС). Построен на основе операционных усилителей постоянного тока (см. рис. 6.7) и RC-звеньев. Предназначен для преобразования входных сигналов по четырем каналам связи:

1) реального дифференцирующего звена в соответствии с выражением (1.77), где

$$K_d = K_0 T_1 / (T_1 + T_2); \quad T_d = T_1 + T_2; \quad (8.8)$$

2) инерционного звена первого порядка в соответствии с выражением (1.26), где

$$K = K_0; \quad T = T_1; \quad 4T_1; \quad (8.9)$$

3) интегрирования в соответствии с выражением (1.62), где

$$k_n = K_0 / T_2; \quad (8.10)$$

4) пропорционально-интегрирующего звена в соответствии с выражением

$$Y^*(p) = K_0 \left(K_d + \frac{1}{pT_2} \right) Y_i(p), \quad (8.11)$$

где

$$K_d = 1; \quad 0,25;$$

5) масштабирования и демпфирования в соответствии с выражением

$$Y^*(p) = \frac{1}{(1 + pT_\phi)} \sum_{i=1}^4 \alpha_i Y_i(p). \quad (8.12)$$

В обозначения (8.8)—(8.12) входят следующие переменные: K_0 — общий коэффициент передачи ($K_0 = 0 \div 10$); T_1 ,

T_2 — изменяемые постоянные времени ($T_1 = T_2 = 5 \div 300$ с);
 T_Φ — постоянная демпфирования ($T_\Phi = 0,5 \div 30$ с); α_i —
 коэффициент масштабирования ($\alpha_i = 0 \div 10$).

Основные технические данные БДС приведены ниже:

Число масштабируемых входных сигналов постоянного тока	4
Число немасштабируемых аналоговых входных сигналов по- стоянного напряжения	1
Выходные аналоговые сигналы постоянного тока	0—5 и —5—
	0—5 мА
При сопротивлении нагрузки	2,5 кОм
Динамические ошибки преобразований:	
по коэффициенту передачи	До 10%
по постоянным времени	До 20%
Статическая ошибка входных и выходных аналоговых сиг- налов и установок	До 0,5%

Блок импульсного интегрирования (интегрирующий мото-
 торный задатчик) (БЗИ) предназначен для преобразова-
 ния входного сигнала по интегральному закону [см. выра-
 жения (1.61) и (1.62)].

Упрощенная функциональная схема БЗИ изображена на рис. 8.7. Блок состоит из нескольких последовательно соединенных узлов. Первый — узел управления мотором (УУМ). Входной сигнал напряжения постоянного тока, например с выхода регулирующего прибора РП4-У, запускает кольцевой счетчик КС, который управляет транзисторными ключами $T1—T4$. В свою очередь КС управляется от импульсного генератора напряжения, собранного на ОУ1. Ручное или дистанционное изменение сопротивления резистора $R1$ изменяет частоту импульсов генератора напряжения и соответственно частоту вращения моторного задатчика — шагового электродвигателя M . Последний связан через червячный механический редуктор P с индуктивным датчиком перемещения ИДП. Электрическое питание датчика осуществляется от вспомогательного источника, собранного на операционном усилителе ОУ2, аналогичном рассмотренным ранее.

Выходной электрический сигнал ИДП, нарастающий по интегрирующему закону через резисторно-диодный делитель ($D1, D2, R6, R7$), выпрямляется и поступает на вход ОУ3, управляющий следующим узлом — УВД (узел выхода динамического сигнала). Последний собран на транзисторах $T5—T6$, выполняющих роль усилителя мощности входного сигнала.

Как и всякий интегрирующий элемент, входящий в систему управления, БЗИ имеет двухканальный ограничитель диапазона изменения (выходного сигнала — УОД). В каждом канале УОД содержится типовой триггерный элемент,

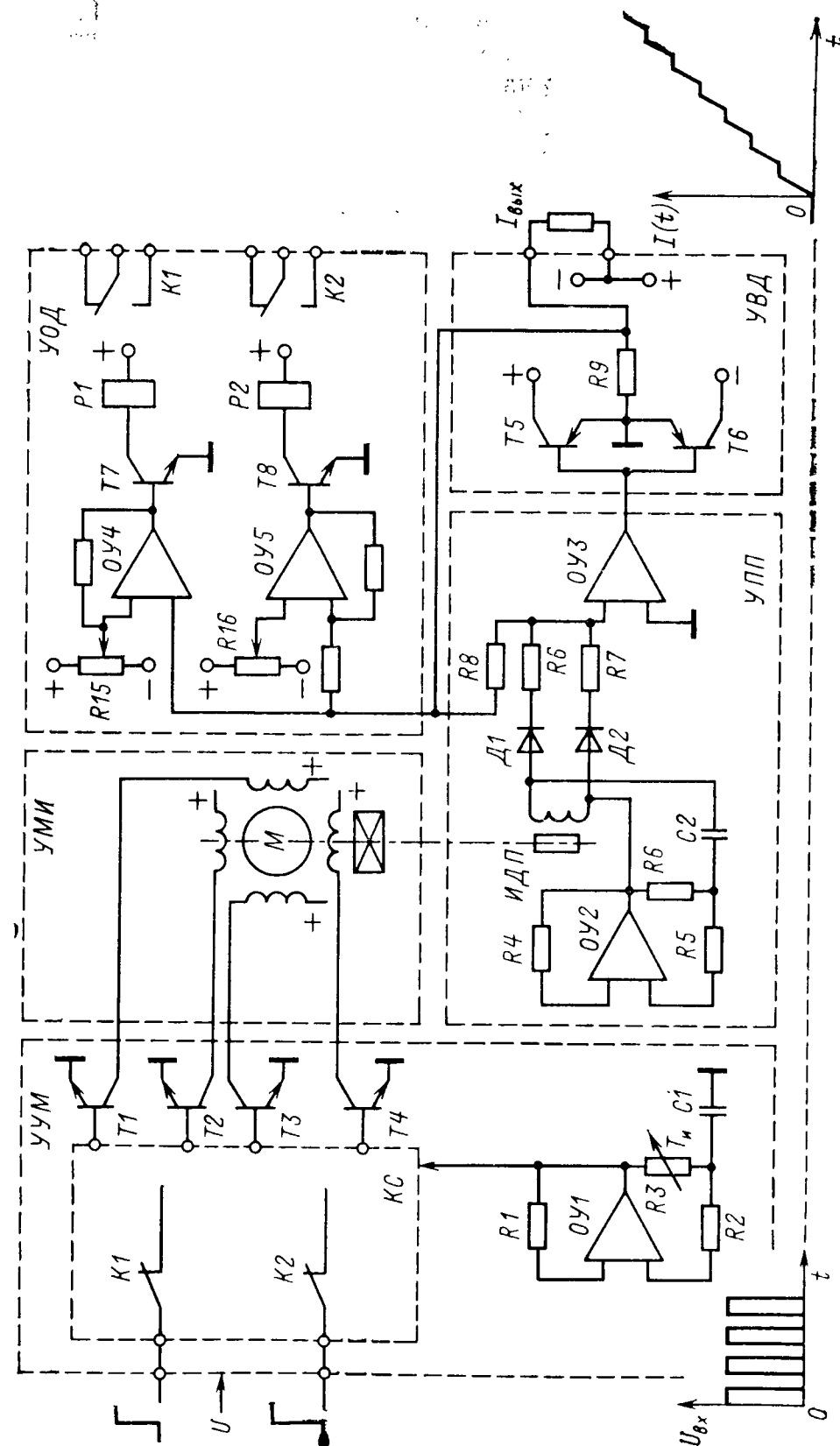


Рис. 8.7. Упрощенная электрическая схема БЗИ

выполненный на операционных усилителях (ОУ4, ОУ5), охваченных положительной обратной связью. Триггер управляет посредством транзисторного усилителя (Т7, Т8) катушкой выходного реле (Р1, Р2) с двумя парами переключающих контактов К1 и К2. Первая из них разрывает цепь входного управляющего сигнала, вторая — включает внешнюю сигнализацию.

Настройка уровня ограничения осуществляется переменными резисторами R15 и R16.

Основные технические данные БЗИ приведены ниже:

Входные дискретные сигналы управления:	
импульсные сигналы напряжения постоянного тока	24 В
выходной аналоговый сигнал	±5 мА
Выходные дискретные сигналы об исчерпании диапазона интегрирования	Положение переключающих контактов реле
Установки ограничения	0 ± 5 мА
Закон преобразования	

$$Y^*(p) = \frac{100}{kT_{\text{нр}}} Y_i(p) + A, \quad (8.13)$$

где $k = 1 \div 15$; $T_{\text{н}} = 10$ с; A — начальное значение выходного сигнала, %.

Блоки статического преобразования сигналов. Блок суммирования (БСД) изображен на рис. 8.10. Он состоит из трех последовательно включенных узлов: входного (УСГР), демпфирования (УД) и выходного двухполярного транзисторного усилителя (УВД). Последний собран по мостовой схеме на транзисторах Т1, Т2. Для компенсации постоянных составляющих входных сигналов предусмотрен встроенный ручной задатчик.

Блок обеспечивает суммирование до четырех входных сигналов и демпфирование суммарного сигнала

$$Y^*(p) = 1/(1 + pT_{\phi}) \sum_{i=1}^4 \alpha_i Y_i(p), \quad (8.14)$$

где α_i — коэффициент передачи по i -му входу ($\alpha_i = 0 \div 1$); T_{ϕ} — постоянная времени демпфирующего фильтра ($T_{\phi} = 0,5 \div 30$ с).

Блок аналого-релейного преобразования (БСС), упрощенная схема которого дана на рис. 8.9. Блок содержит типовой входной узел (УСГР), демпфер, описанный ранее (УД), и основной функциональный узел триггеров. Послед-

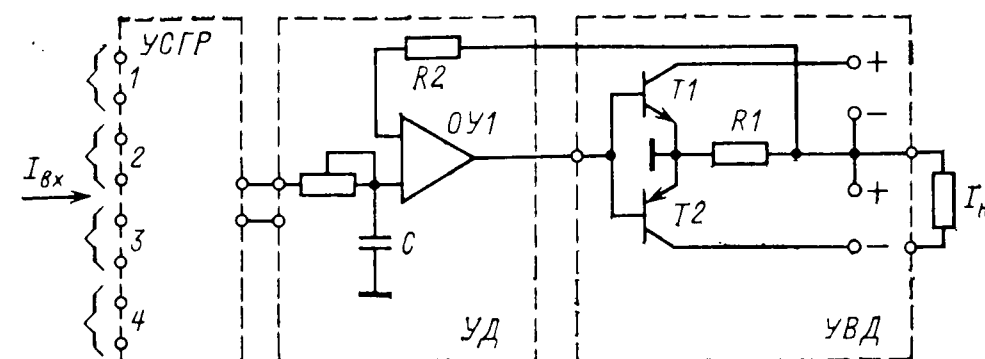


Рис. 8.8. Блок статического преобразования сигналов

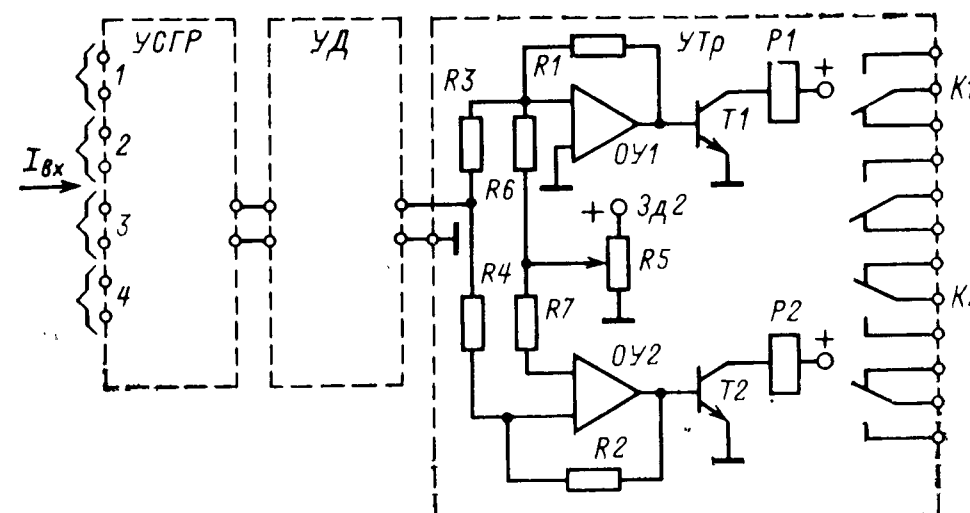


Рис. 8.9. Упрощенная схема БСС

ний состоит из двух триггеров, выполненных на базе ОУ1 и ОУ2, с транзисторными усилителями Т1 и Т2 на выходе, управляющими реле Р1 и Р2. Триггерный эффект ОУ достигается положительной обратной связью через резисторы R1 и R2.

Блок БСС обеспечивает выполнение следующих операций:

масштабирование и суммирование до трех аналоговых входных сигналов

$$Y^* = \sum_{i=1}^3 \alpha_i Y_i, \quad (8.15)$$

где $\alpha_i = 0 \div 10$;
демпфирование суммы

$$Y^* = 1/(1 + pT_{\phi}) \sum_{i=1}^3 \alpha_i Y_i, \quad (8.16)$$

где $T_{\phi} = 0,5 \div 30$ с;

формирование релейных выходных сигналов в момент достижения суммарным входным сигналом одного из двух заданных значений уставок

$$Y_1 \geq A_1; \quad Y_2 \leq A_2, \quad (8.17)$$

где A_1 — уставка, вводимая выносным задатчиком через входной сумматор ($A_1 = 0 \div 100 \%$); A_2 — уставка, вводимая встроенным задатчиком ($A_2 = \pm 50 \%$).

Блок аналого-релейного преобразования может быть использован как трехпозиционный регулятор и как нуль-орган в схеме управления синхронным ходом двух исполнительных механизмов от одного регулирующего прибора. В последнем случае сигнал по положению каждого регулирующего органа от датчика положения (ДП) подается на БСС через УСГР. В случае появления разности сигналов $x_{p1} - x_p$, нуль-орган срабатывает в направлении ее уменьшения.

Вспомогательные блоки. Блок ручного управления регулятором (БРУ-32, рис. 8.8) состоит из коммутирующего устройства и встроенного индикатора положения регулирующего органа, соединенного с индукционным датчиком положения. Поворотным ключом с фиксированным положением ручки устанавливается вид управления (дистанционное или автоматическое), нажатием кнопки «больше» («меньше»), снабженной пружиной возврата в исходное положение, осуществляется дистанционная передача управляющего сигнала от источника электрического питания к усилителю мощности электропроводности исполнительного механизма.

Блок переключения цепей управления (БУ 222) состоит из коммутирующего устройства и индикатора состояния выходных контактов реле. Позволяет вручную или дистанционно (по сигналу от внешнего логического устройства) переключать управляющие и информационные цепи регулятора по необходимому каналу и «запоминать» последнюю команду.

Широкодиапазонный задатчик РЗд 22 выполнен на базе ОУ постоянного тока. Обеспечивает подачу независимого стабильного сигнала $0-5$ мА на вход регулирующего прибора (функционального блока) и взаимное преобразование сигналов $0-5$, $0-20$, $4-20$ мВ и $0-10$ В.

Конструктивные признаки регулирующей аппаратуры АКЭСР 2 связаны с возвращением к приборному исполнению и секционированием функциональных узлов. В ближней к лицевой панели секции размещаются органы статической и динамической настройки, доступные для ручного воздействия при частичном выдвижении прямоугольного шасси. Среднюю секцию, наибольшую по размеру, занимает

единая печатная плата, несущая все элементы микросхемы. В торце шасси расположены все крупногабаритные элементы и узел питания. Единая печатная плата и секционирование в сочетании с микроэлектронным исполнением дают определенные преимущества: упрощение внутренних соединений, сокращение трудозатрат при изготовлении и сборке узлов и как следствие повышение надежности в процессе длительной эксплуатации. В то же время габариты и масса прибора не превышают по размерам аналогичные по назначению электрические средства регулирования при достаточно хорошем доступе ко всем внутренним элементам микросхемы. На задней стенке шасси крепится гибкий плоский кабель, связывающий функциональные узлы и узел питания с внешним выводом.

Вспомогательные блоки АКЭСР 2 размещаются в корпусах меньших размеров.

8.5. НАЛАДКА РЕГУЛИРУЮЩИХ ПРИБОРОВ И ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АППАРАТУРЫ АКЭСР 2 В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Процесс наладки предусматривает выполнение следующих операций:

1) проверка работоспособности аппаратуры при подсоединении источников питания и нагрузки;

2) проверка правильности соединения электрических цепей и фазировки (согласование знаков управляющих и исполнительных воздействий);

3) расчет настроек регуляторов по параметрам, характеризующим динамические свойства объекта управления (см. § 5.3—5.6);

4) установка расчетных значений настроек на регулирующем приборе и функциональных блоках;

5) пробное включение регулятора в работу на действующем оборудовании или на его модели и определение показателей качества АСР (см. § 4.6; 4.7);

6) корректировка настроек с учетом определенных опытным путем показателей качества АСР.

Первые четыре операции могут выполняться как на лабораторных стендах, так и на действующем оборудовании. Для головных образцов АСР желательно предварительное выполнение всех шести этапов наладки на гибридных имитирующих моделях. Однако и в этом случае выполнение заключительных этапов наладки (пп. 5 и 6) на действующем оборудовании обязательно.

Проверка работоспособности каждого регулирующего прибора производится отдельно. Для этого для всех моди-

фикаций регулирующих приборов следует провести следующее: произвести тщательный внешний осмотр аппаратуры; повернуть все ручки настроек до упора против часовой стрелки; подать напряжение от источника питания; сбалансировать РП ручкой «корректор» встроенного задатчика; убедиться, что при повороте ручки по часовой стрелке загорается одна из сигнальных ламп, а при повороте против — другая; поставить ручки K_p и T в среднее положение; разбалансировать прибор и убедиться, что на выходе РП отрабатывается последовательность импульсов, т. е. включается одна из сигнальных ламп через равные промежутки времени; убедиться, что поворот ручки «импульс» по часовой стрелке приводит к увеличению длительности импульсов.

Установка статических параметров настройки:

настройка прибора на отработку заданного значения регулируемой величины: подать на вход УСГР сигнал, соответствующий заданному значению регулируемой величины и сбалансировать прибор с помощью внешнего задатчика;

совмещение статических характеристик датчиков при наличии двух и более первичных преобразователей, если сигналы вычитаются; например, в случае двух датчиков и произвольном положении ручки α_1 положение α_2 определяется из соотношения

$$\alpha_2 = \alpha_1 \frac{Y_{1,\text{макс}}}{Y_{2,\text{макс}}}, \quad (8.18)$$

где $Y_1, Y_{2,\text{макс}}$ — максимальные сигналы на выходе датчиков в расчетном диапазоне изменения регулируемых величин;

расхождение статических характеристик по различным каналам допускается лишь в пределах зоны нечувствительности прибора Δ_n ;

установка зоны нечувствительности Δ_n осуществляется воздействием на ручку «нечувствительность» (резистор $R14$ на рис. 8.6); рекомендуемое значение зоны нечувствительности

$$\Delta_n \approx 0,5 y_{\delta} \alpha_i, \quad (8.19)$$

где $y_{\delta} = y^{\text{уст}} - y_0$ — допускаемая абсолютная погрешность (статическая ошибка регулирования); α_i — положение ручки масштабирования по каналу измерения регулируемой величины;

установка постоянной времени демпфера осуществляется

воздействием на ручку «демпфер» (резистор $R6$ на рис. 8.6); рекомендуемое значение

$$T_{\phi} = 0,6 \frac{Y_{1,\text{макс}}}{\Delta_n} T_n, \quad (8.20)$$

где $Y_{1,\text{макс}}$ и T_n — наиболее характерные (часто повторяющиеся) амплитуда и период случайных колебаний регулируемой величины; Δ_n — установленное значение нечувствительности; после установки производится коррекция аппроксимирующей математической модели объекта регулирования [см. формулы (2.21) и (2.22)], если кривые разгона определены без учета временного фильтра.

Установка динамических параметров настройки. Данной операции предшествует расчет оптимальных значений основных параметров настройки регулятора, например $K_{\text{опт}_p}$ и $T_{\text{опт}_n}$ для ПИ-регулятора (см. § 5.3—5.6):

$$\alpha_k = \alpha_i K_p^{\text{опт}} T_c, \quad (8.21)$$

где α_i — положение ручки масштабирования по каналу регулируемой величины; T_c — постоянная времени сервопривода исполнительного механизма;

установка постоянной времени интегрирования (удвоения) T_n осуществляется непосредственно по шкале $\alpha T_n, \text{с}$;

установка длительности импульса t_n (см. рис. 6.13); рекомендуемое положение ручки «импульс»

$$t_n = \alpha_k \Delta_n, \quad (8.22)$$

где α_k, Δ_n определяются по формулам (8.19) и (8.21); минимальное значение $t_{n,\text{мин}} \geq t_p$ ограничивается инерцией пусковых устройств и наличием времени разгона сервопривода t_p после поступления управляющего сигнала (см. рис. 6.12).

Опытная проверка фактического T_n осуществляется из кривой разгона регулятора (см. рис. 6.13) как времени удвоения ступенчатого сигнала или по формуле

$$T_n = \frac{\Delta t_{\text{вкл}} \sum_{i=1}^{8-10} (t_{ni} + t_{ni})}{\sum_{i=1}^{8-10} t_{ni}}, \quad (8.23)$$

где $\Delta t_{\text{вкл}}$ — длительность первого (после подачи ступенчатого управляющего сигнала) включения сигнальной лампы;

Контрольные вопросы

1. Поясните, пользуясь рис. 8.1, принцип действия релейно-импульсного регулятора с регулирующим блоком РБИ.
2. Как работает регулятор с аналоговым выходом на основе РБА? Укажите область его применения.
3. Поясните, пользуясь рис. 8.3, как осуществляется дистанционная подстройка динамических параметров K_p и T_n ?
4. Для чего служит блок БДП?
5. В чем функциональное назначение блока БСГ?
6. Поясните принцип действия регулирующего прибора РП4-У (рис. 8.11).
7. Какие функции реализует блок БДС?
8. Как работает моторный интегрирующий задатчик БЗИ?
9. Поясните работу БСС в режиме нуль-органа.
10. Поясните действие блока БСС (рис. 8.9).
11. Какие функции выполняют блоки БНП, БСЛ и БВО?
12. Какие дискретные операции по управлению осуществляются с помощью вспомогательных блоков БРУ22 и БРУ32?
13. В чем состоит настройка статических параметров регулирующего блока?
14. Назовите параметры динамической настройки ПИ-регулятора; как они устанавливаются на регулирующем приборе РП4-У?

Глава девятая

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

9.1. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ МЗТА

Исполнительный механизм предназначен для перемещения регулирующего органа. Он состоит из электрического сервопривода и колонки дистанционного управления (КДУ).

Сервопривод. Электрический сервопривод представляет собой трехфазный асинхронный двигатель переменного тока, рассчитанный на напряжение 220/380 В и частоту вращения 1400 об/мин, сочлененный с двухступенчатым редуктором. Первая ступень редуктора имеет передаточное отношение $i_1 = 1:70$, вторая $i_2 = 1:40$ (1:20). Общее передаточное число редуктора $i_p = 2800$ (1400). На выходном валу сервопривода крепятся рычаг для сочленения с регулирующим органом (в случае тросового соединения — диск)

и профилированный кулачок для сочленения с тягой датчика указателя положения. Полный ход сервопривода соответствует повороту выходного вала на 90° . Время полного хода называется временем сервопривода (сервомотора) T_c .

При ручном управлении регулирующим органом служит штурвал, который выдвигается «на себя» и выводит из зацепления с электродвигателем приводную червячную пару. Поворот выходного вала в этом положении осуществляется вращением штурвала вручную.

Электрические сервоприводы выпускаются нескольких моделей с различной мощностью электродвигателя и временем сервомотора. Сервоприводы малой модели РМ и РМБ (быстроходный) имеют мощность электродвигателя 0,15—0,25 кВт и развивают на выходном валу крутящий момент до 25 кгм. Сервоприводы большой модели серии РБ развивают на выходном валу моменты, равные 100 кгм (РБ-100), 200 кгм (РБ-200) и 400 кгм (РБ-400). Для моделей РМ и РБ $T_c = 30 \div 60$ с, для модели РМБ — 15 с.

Колонка дистанционного управления типа КДУ-I служит для управления сервоприводами серий РМ, РМБ и РБ. *Колонка дистанционного управления КДУ-II/П* в отличие от КДУ-I снабжена датчиком перемещения выходного вала и путевыми выключателями и также предназначена для установки на сервоприводах серий РМ и РБ. Общий вид колонки представлен на рис. 9.1. Внутри корпуса колонки размещены колодка зажимов 12, панель 7, на лицевой стороне которой смонтированы концевые и путевые выключатели, а на тыльной — цепи электрического питания потенциометрического датчика 10 указателя положения УП и индукционного датчика перемещения 1. Концевые выключатели К служат для ограничения перемещения выходного вала сервопривода при дистанционном управлении. Путевые выключатели (на рис. 9.1 не показаны) выполняют эту же задачу при управлении КДУ от регулирующего прибора. Предельные углы поворота выходного вала редуктора при автоматическом и дистанционном управлении различаются по значению и регулируются двумя регулировочными винтами, установленными на верхних и нижних поворотных рычагах выключателей. Движение выходного вала редуктора через тягу передается поворотному рычагу 2, который, поворачиваясь вокруг своей шарнирной опоры, перемещает движок потенциометрического датчика и одновременно с ним посредством тяги и рычага 3 плунжер индукционного датчика переменного тока, предназначенного для формирования сигнала, пропорционального перемеще-

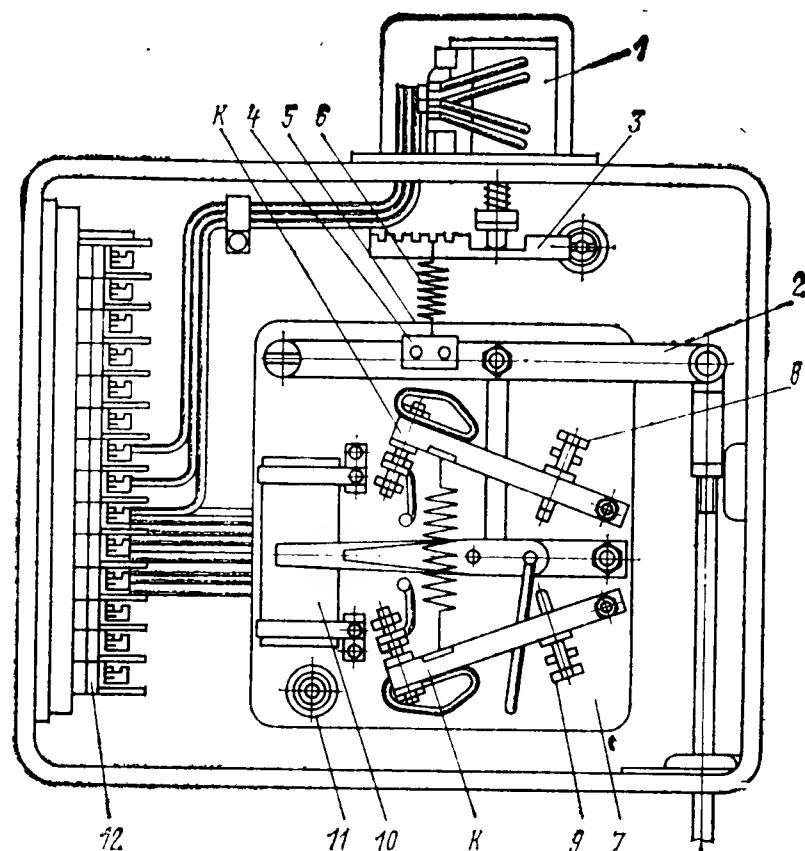


Рис. 9.1. Внешний вид КДУ-11/II:

1 — плунжерный индукционный датчик перемещения; 2 — рычаг обратной связи по положению выходного вала редуктора; 3—6 — механизм передачи движения от рычага к плунжеру датчика; 7 — монтажная плата; 8, 9 — регулировочные винты концевых (путевых) выключателей; 10 — реостат указателя положения; 11 — корректор нуля РУП; 12 — колодка зажимов; К — концевые выключатели

нию выходного вала сервопривода (регулирующего органа).

Исполнительные механизмы типа МЭОК (механизм электрический однооборотный контактный) предназначены для контактного управления электроприводом и перемещения регулирующих органов АСР технологическими процессами в соответствии с управляющими сигналами, поступающими от регулирующих устройств. Механизм состоит из литого металлического корпуса, в котором размещаются тихоходный редуктор с электроприводом и узел ручного привода-дублера. В нем установлены также датчик перемещения с унифицированным токовым выходным сигналом 0—5 мА и два концевых выключателя.

Исполнительные механизмы типа МЭОБ (механизм электрический однооборотный бесконтактный) предназна-

чены для бесконтактного управления сервоприводом и снабжены электромагнитным тормозом, подключаемым параллельно обмотками статора электродвигателя.

9.2. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ТИПА МЭО

Исполнительный механизм электрический однооборотный (МЭО) обеспечивает бесконтактное управление и состоит из двухфазного асинхронного электродвигателя типа ДАУ, многоступенчатого зубчатого редуктора, электромагнитного тормоза и датчика перемещения. Частота вращения выходного вала редуктора при работе электродвигателя постоянна, но может меняться путем изменения передаточного отношения редуктора. Угол полного перемещения выходного вала может устанавливаться в диапазоне 0—90 и 0—240°. Фрикционная муфта электрического тормоза расположена на валу электродвигателя и прижата к нему пружиной. При появлении управляющего сигнала электромагнит оттягивает муфту и растормаживает электродвигатель. При исчезновении управляющего сигнала пружина вновь прижимает муфту к валу, при этом разгон и выбег выходного вала находятся в пределах 0,5—1°.

Исполнительные механизмы типа МЭО допускают длительную работу в стопорном режиме, когда механическое ограничение перемещения выходного вала сервопривода (вращение до упора) не требует отключения напряжения электродвигателя. Это позволяет исключить контакты концевых выключателей из цепей управления и тем самым повысить надежность системы управления.

Преобразование положения выходного вала в электрический сигнал обеспечивается с помощью двух индуктивных датчиков типа БДИ-6 и реостатных типа БДР. Имеются также контакты для сигнализации крайних и промежуточных положений выходного вала.

9.3. ПУСКОВЫЕ УСТРОЙСТВА

В соответствии с разновидностями регулирующих блоков систем РПД, КАСКАД и АКЭСР имеются два вида усилителей мощности, выполняющих функции пусковых устройств: для усиления дискретного (прерывистого) сигнала 0—24 В (релейные контактные и бесконтактные усилители) и для усиления аналогового сигнала 0—5 мА (бесконтактные аналоговые усилители) [7].

Контактные пусковые устройства. Пускатель магнитный реверсивный ПМРТ-69-1 предназначен для управления трехфазным асинхронным двигателем переменного тока мощностью 0,27 кВт при напряжении 220/380 В и объединяет два механически и электрически заблокированных контактора. Каждый контактор имеет три нормально разомкнутых силовых контакта, включенных в цепь питания электродвигателя, и вспомогательный нормально замкнутый блок-контактор для электрической блокировки управляющих катушек магнитного пускателя. Управление пускателем осуществляется постоянным (двухполупериодным) пульсирующим напряжением со средним значением 24 В при автоматическом управлении или переменным напряжением при дистанционном управлении. ПМРТ-69-2 предназначен для управления более мощным двигателем (0,4—1 кВт).

Бесконтактные пусковые устройства. Для бесконтактного управления электроприводом используются магнитный или тиристорный усилитель. Переход на бесконтактные пусковые устройства связан с недостаточной надежностью контактных магнитных пускателей. В тиристорном и магнитном усилителях сигнал, поступающий от регулирующего прибора, усиливается до уровня, достаточного для управления исполнительным механизмом.

Магнитный усилитель типа МУ-2Э, принципиальная электрическая схема которого совместно с управляемым с его помощью бесконтактным исполнительным механизмом типа МЭО приведена на рис. 9.2, собран на четырех магнитопроводах I—IV. Насыщение магнитопроводов осуществляется обмотками смещения 5—6. Эта обмотка питается выпрямленным с помощью диодов Д1 и Д2 двухполупериодным напряжением, значение которого может изменяться при настройке усилителя путем изменения положения ручки переменного резистора R. Питание выходных обмоток 1—2 и 3—4 осуществляется от первичной обмотки автотрансформатора Tr. Обмотки 7—8—9—10 являются управляющими. Напряжение на них (входной сигнал) поступает с выхода РП, пройдя через внешние цепи управления. При отсутствии входного сигнала, а следовательно, и тока в управляющих обмотках все четыре магнитопровода (I—IV) насыщены одинаково. Поэтому токи в один из полупериодов в обмотках 3—4, в другой полупериод в обмотках 1—2 равны, а через управляющую обмотку двигателя II текут в противоположных направлениях. В результате ток в ней в оба полупериода отсутствует. Появление тока в одной из управляющих обмоток (7—8, 1—9 или 10—9, 7—8) вызовет изменение магнитного потока в сердечниках усилителя. В двух из этих сердечников (III и IV или I и II) магнитный поток складывается с потоком от

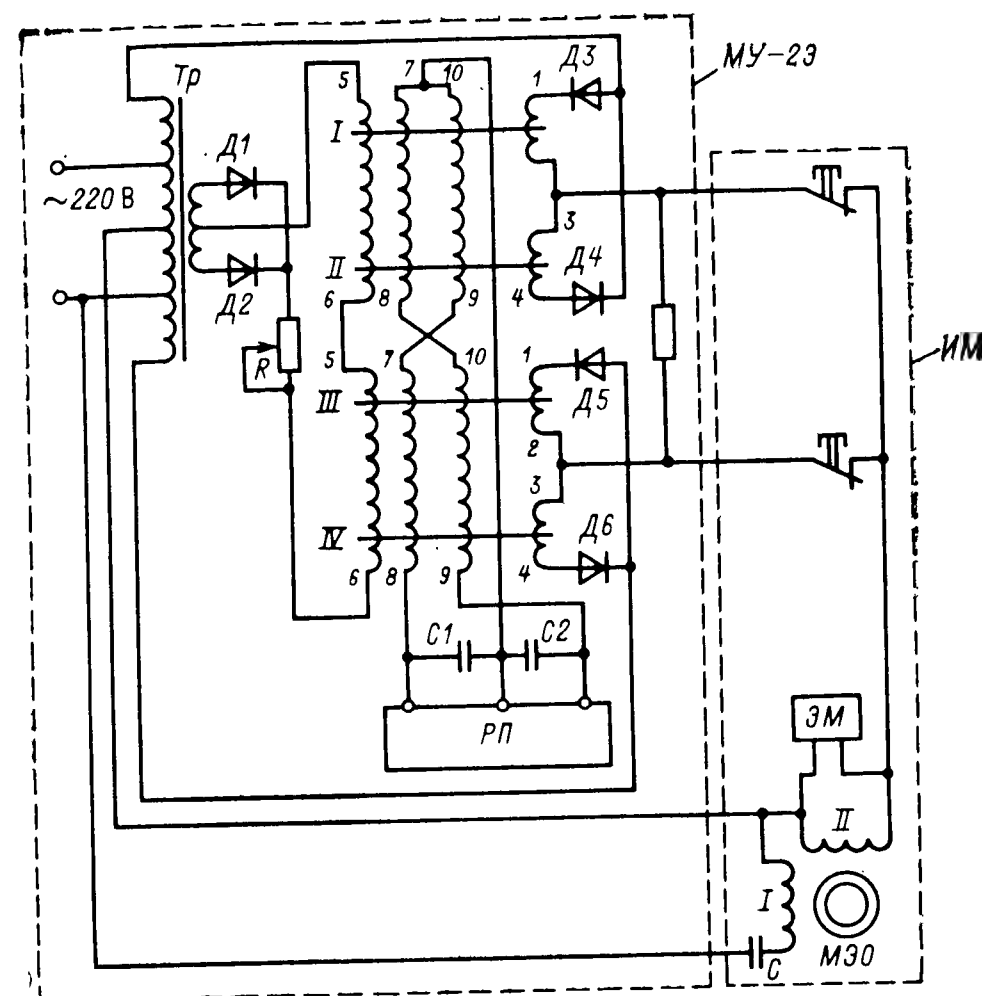


Рис. 9.2. Принципиальная схема магнитного усилителя МУ-2Э

тока в выходных обмотках, в двух — вычитается. При этом в оба полупериода встречно-направленные токи через управляющую обмотку II двигателя не равны друг другу, и на ней появляется переменное напряжение. Рабочая обмотка I двигателя питается переменным напряжением от автотрансформатора Tr, сдвинутым по фазе при помощи конденсатора С. При появлении переменного напряжения на обмотке II электродвигатель начнет вращаться в направлении, которое зависит от фазы напряжения на управляющей обмотке II. Фаза в свою очередь определяется тем, на какой из сигнальных обмоток магнитного усилителя (7—8, 10—9 или 10—9, 7—8) появилось напряжение. Одновременно с появлением напряжения на обмотке двигателя II появляется напряжение на обмотке электромагнита электромеханического тормоза ЭМ, который, оттягивая муфту, растормаживает выходной вал двигателя в моменты его включения и тормозит при остановках. При дистанционном управлении напряжение на одну из управляющих обмоток МУ подается через кнопки или ключ дистанционно-

го управления от источника постоянного тока, собранного на диодах Д1 и Д2.

Магнитный усилитель типа МУ-2Б отличается от МУ-2Э только значением входного сопротивления (МУ-2Э 160 Ом и МУ-2Б 5000 Ом).

Магнитный усилитель типа УМД используется для управления исполнительными механизмами с двухфазными асинхронными двигателями типа ДАУ. Принцип действия усилителей УМД и МУ-2Э одинаков. Усилитель обеспечивает отработку двигателем сигналов длительностью 0,15—0,2 с.

Выше отмечалось, что исполнительный механизм типа МЭО с двигателем типа ДАУ может находиться длительное время (до 1000 ч) в стопорном режиме, при котором выходной вал, жестко сочлененный с регулирующим органом, удерживается упорами. Это позволяет убрать концевые выключатели из цепей управления и повысить надежность управления двигателем.

Тиристорный усилитель (типа У-101) предназначен для работы с трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором (серия АОЛ) и, обладая преимуществами бесконтактного пускового устройства, имеет большее быстродействие и меньшие по сравнению с магнитными усилителями габариты.

Принципиальная электрическая схема У-101 приведена на рис. 9.3. Усилитель построен по блочно-модульному принципу и состоит

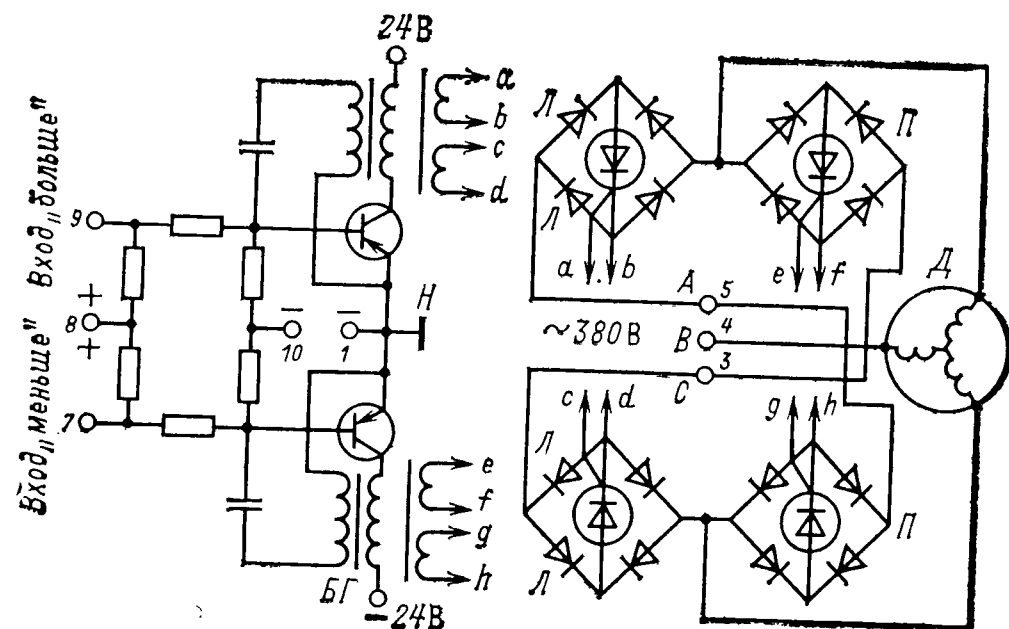


Рис. 9.3. Принципиальная схема тиристорного усилителя

из семи модулей: модуля блокинг-генератора БГ, четырех левых и правых (Л и П) тиристорных ключей, блока питания и блока защиты (последние два на схеме не показаны). Каждый полупроводниковый ключ состоит из мостикового выпрямителя на четырех диодах. В одну из диагоналей моста включен тиристор, в другую через фазную обмотку двигателя Д подводится силовое напряжение 380 В. На вход тиристорного усилителя (зажимы 7—8—9) поступает управляющий сигнал с напряжением 24 В с выхода РП.

Усилитель тиристорный трехпозиционный У-23 входит в комплекс устройств Каскад 2. Действует по принципу У-101. Обеспечивает: прямой и обратный ход электродвигателя и его электрическое торможение при останове; блокировку цепей управления на пуск двигателя в обе стороны одновременно; сигнализацию и отключение двигателя при перегрузке.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение исполнительных механизмов?
2. Для чего служат концевые и путевые выключатели, устанавливаемые в КДУ-II/П?
3. Поясните принцип действия контактного магнитного пускателя типа ПМРТ.
4. Поясните принцип действия бесконтактного пускового устройства — магнитного усилителя типа МУ-2Э (рис. 9.2).
5. Как осуществляется бесконтактное управление работой электродвигателя и реверсирование хода исполнительного механизма на рис. 9.3?

Часть третья

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

Глава десятая

ТЕПЛОВАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

10.1. НАЗНАЧЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ АВТОМАТИКИ НА ТЭС

Современные тепловые электрические станции, работающие на природном (органическом) топливе, используют для выработки электроэнергии промежуточный теплоноситель — перегретый водяной пар [12].

Особенность технологического процесса на ТЭС (рис. 10.1) состоит в невозможности складирования готовой продукции — электроэнергии при весьма ограниченной тепловой аккумулирующей способности основных источников теплоты — паровых котлов. Поэтому количество пара, выработанного паровым котлом, мощность, развиваемая

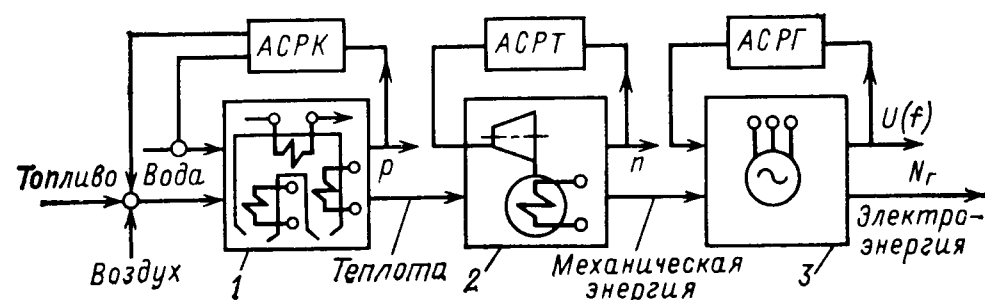


Рис. 10.1. Система регулирования мощности ТЭС:

1 — паровой котел; 2 — турбина; 3 — электрический генератор; p — давление пара на выходе котла; n — частота вращения ротора; U — напряжение; f — частота переменного тока электрической сети; N_r — электрическая мощность генератора

турбогенератором, и электрическая нагрузка, задаваемая потребителем, должны строго соответствовать между собой во времени.

Исходя из необходимости непрерывного поддержания баланса по расходу пара, вырабатываемого котлом и потребляемого турбиной, регулирование его расхода ведется по наиболее простому с точки зрения измерения косвенному показателю этого баланса — давлению перед турбиной p . Стабилизация p осуществляется автоматической системой регулирования парового котла (АСРПК).

Баланс теплоты и механической мощности турбины также контролируется простым косвенным показателем — частотой вращения ротора n и поддерживается автоматической системой регулирования мощности турбины (АСРТ).

Качество конечной продукции ТЭС — электроэнергии должно отвечать требованиям ГОСТ 13.109.67. Допустимые отклонения колебаний промышленной частоты f составляют $\pm 0,2$ Гц (0,4 %), а по напряжению на шинах генератора $U_r \pm 5$ %. Для поддержания этих показателей важная роль принадлежит автоматической системе регулирования электрического генератора (АСРГ).

Кроме основных объектов управления — паровых котлов, турбин и генераторов, на ТЭС имеется значительное количество вспомогательных теплоэнергетических установок, также оснащенных автоматическими устройствами регулирования и защиты [13].

Чтобы уяснить роль тепловой автоматики в работе ТЭС, рассмотрим принципиальную тепловую схему станции (рис. 10.2). Паровой котел снабжается питательной водой от насоса 14 через регулирующий клапан 16. В топку котла с помощью топливоприготовительных устройств 3 подается топливо B_T (каменноугольная пыль, горючий газ, мазут или смесь разных видов топлива). Вентилятором 4 нагнетается воздух Q_B и дымососом 5 отсасываются продукты сгорания — дымовые газы Q_r .

Требуемая подача топливоприготовительных устройств, вентиляторов, дымососов и питательных насосов устанавливается автоматически или дистанционно в зависимости от паропроизводительности $D_{п.п}$ и давления перегретого пара $p_{п.п}$. Насыщенный водяной пар, выработанный в испарительной части 1 парового котла, перегревается до требуемой температуры в пароперегревателе 2; при этом температура перегрева $t_{п.п}$ поддерживается вблизи заданного значения автоматическим регулятором. Далее перегретый пар через регулирующие клапаны 6 поступает в проточную часть турбины 7, где происходит превращение тепловой энергии теплоносителя — перегретого водяного пара — в механическую энергию вращения ротора турбины и гене-

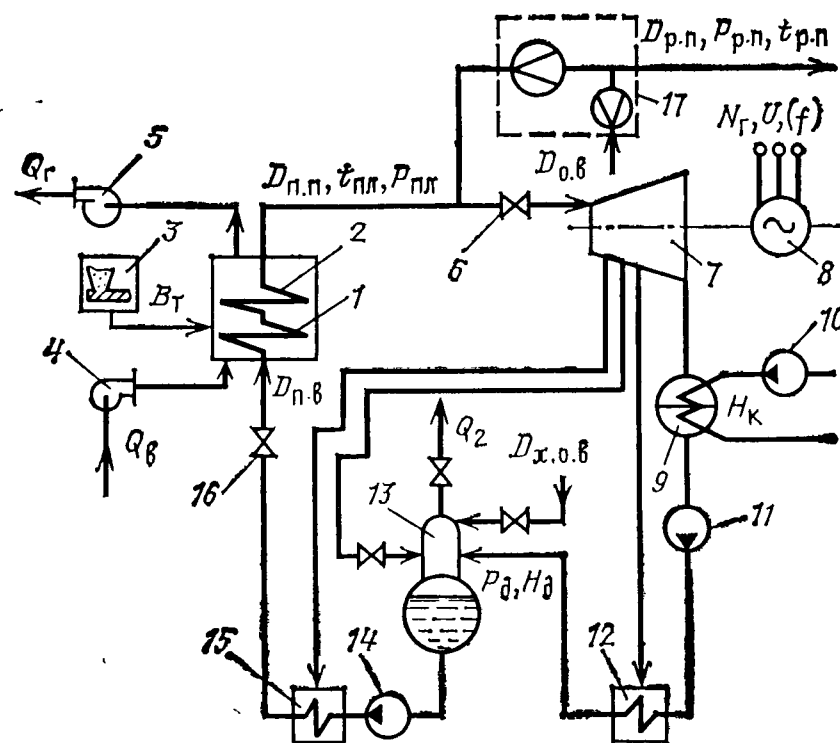


Рис. 10.2. Принципиальная тепловая схема ТЭС

ратора 8. Для обеспечения постоянства частоты генерируемого тока ротор должен вращаться с постоянной скоростью независимо от электрической нагрузки генератора. Поддержание постоянства частоты вращения n осуществляется АСРТ.

Отработанный пар из турбины поступает в конденсатор 9, где он охлаждается и конденсируется на поверхности трубной системы, в которой циркулирует охлаждающая вода, поступающая от насоса 10. Уровень конденсата в конденсаторе H_k должен поддерживаться постоянным независимо от количества конденсируемого в нем пара. Эту задачу выполняет автоматический регулятор уровня в конденсаторе, воздействующий на подачу конденсатных насосов. Далее конденсат турбины прокачивается насосами 11 через систему подогревателей низкого давления (ПНД) 12 и поступает в смешивающий подогреватель — деаэратор 13. В деаэраторе конденсат смешивается с химически очищенной водой $D_{х.о.в.}$, подаваемой для восполнения потерь, и доводится до температуры насыщения (кипения), при которой происходит удаление растворенного в воде кислорода O_2 .

Нормальный режим работы деаэратора и установленного за ним питательного насоса 11 возможен лишь при постоянстве давления пара в деаэраторной головке p_d и уровня воды H_d в аккумуляторном баке. Это обеспечивается автоматическими регуляторами давления и уровня в деаэраторе, воздействующими соответственно на расход греющего пара и химически очищенной воды, поступающих в деаэратор. Вода

из деаэратора перекачивается питательными насосами 14 через систему подогревателей высокого давления (ПВД) 15 и поступает в экономайзерную и испарительную части парового котла. Расход воды регулируется автоматическим регулятором питания. На этом технологический цикл превращения теплоты в электрическую энергию замыкается, и описанный выше процесс повторяется.

Тепловые электростанции, вырабатывающие, помимо электрической энергии, и тепловую (ТЭЦ), оборудуются редуционно-охладительными установками (РОУ) 17, предназначенными для резервирования теплофикационных и промышленных отборов пара турбин. Поддержание постоянства давления $p_{р.п.}$ и температуры $t_{р.п.}$ редуцированного пара обеспечивается автоматическими регуляторами давления и температуры, воздействующими соответственно на изменение расхода редуцированного пара и охлаждающей воды $D_{р.п.}$ и $D_{о.в.}$.

10.2. РЕГУЛИРУЮЩИЕ ОРГАНЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Регулирующим органом называется устройство, позволяющее изменять расход (направление потока) энергии или вещества в соответствии с требованиями технологического процесса. Регулирующие органы разделяют на три группы.

Регулирующие органы дроссельного типа, изменяющие расход среды за счет изменения скорости и площади живого сечения потока при прохождении его через дросселирующее устройство, гидравлическое сопротивление которого является переменной величиной (клапаны, заслонки и шиберы). Массовый расход вещества, кг/с, через дроссельный регулирующий орган определяется по формуле

$$G = \mu_{кл} F \sqrt{2\Delta p \rho}. \quad (10.1a)$$

Объемный расход, м³/с,

$$Q = \mu_{кл} F \sqrt{2\Delta p / \rho}, \quad (10.1б)$$

где $\mu_{кл}$ — коэффициент расхода, под которым понимают отношение действительного измеренного расхода среды к расчетному; F — площадь открытия регулирующего органа, м²; Δp — гидравлическое сопротивление дроссельного устройства, Па (Н/м²); ρ — плотность вещества, кг/м³.

Регулирующие органы объемного типа, изменяющие расход среды за счет изменения ее объема (например, лен-

точные питатели сырого угля). Уравнение расхода, $\text{м}^3/\text{с}$, в этом случае имеет вид

$$Q = Fv, \quad (10.1в)$$

где F — регулируемая площадь потока, м^2 ; v — скорость потока, $\text{м}/\text{с}$.

Регулирующие органы скоростного типа, изменяющие подачу транспортирующего устройства за счет скорости его вращения. К регулирующим органам этого типа относятся устройства регулирования частоты вращения первичных двигателей (паровых или электрических насосов, вентиляторов, дымососов и др.). Требуемое изменение расхода в этом случае определяется уравнением

$$Q_1/Q_2 = n_1/n_2. \quad (10.2)$$

Действие регулирующего органа определяется статическими характеристиками: диапазоном регулирования и рабочей расходной характеристикой.

Диапазон регулирования R — отношение максимального расхода среды к минимальному, соответствующее перемещению регулирующего органа из одного крайнего положения $x_{\text{мин}}^{\text{р.о}}$ в другое $x_{\text{макс}}^{\text{р.о}}$ для регулирующих органов дроссельного и объемного типов $R = Q_{\text{макс}}/Q_{\text{мин}} (G_{\text{макс}}/G_{\text{мин}})$; изменению частоты вращения рабочего колеса вращающегося механизма от максимума до минимума для регулирующих органов скоростного типа $B = n_{\text{макс}}/n_{\text{мин}}$.

Рабочая расходная характеристика — зависимость расхода среды (Q, G) от положения регулирующего органа:

$$Q = f(x_{\text{р.о}}); \quad G = f(x_{\text{р.о}}).$$

При разработке, выборе и отладке регулирующих органов стремятся получить достаточный диапазон регулирования для обеспечения возможности управления процессом при всех режимах и нагрузках агрегата и стабильную рабочую характеристику в пределах этого диапазона. Отлаженные и надежные регулирующие органы со стабильными рабочими характеристиками и достаточным диапазоном регулирования во многом обеспечивают безотказную и эффективную работу АСР.

10.3. РЕГУЛИРУЮЩИЕ ОРГАНЫ РАСХОДА ПАРА, ГАЗА И ЖИДКОСТЕЙ

Для изменения расхода жидкости, пара или газа, транспортируемых по трубопроводам, служат регулирующие клапаны, шиберы и заслонки.

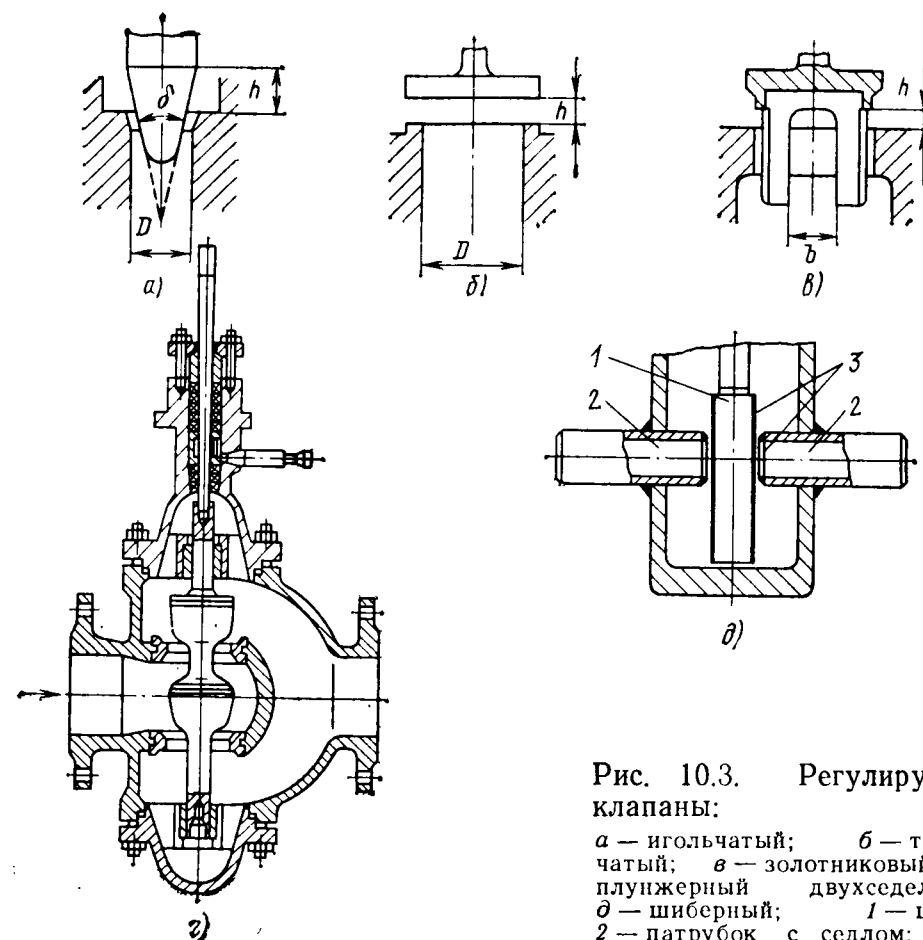


Рис. 10.3. Регулирующие клапаны:

а — игольчатый; б — тарельчатый; в — золотниковый; г — плунжерный; д — двухседельный; е — шиберный; ж — шибер; з — патрубок с седлом; и — наплавка

Дроссельные регулирующие клапаны. Существует несколько конструктивных разновидностей клапанов, различающихся формами плунжера и седла (рис. 10.3)¹. Базовые конструкции для жидкостей определяются ГОСТ 12891-67 и 14239-69, для газов — ГОСТ 12891-67 и 14239-69. Каждая конструкция имеет особую конструктивную характеристику — зависимость площади проходного сечения клапана от положения плунжера h .

Конструктивные характеристики клапанов, изображенных на рис. 10.3, имеют следующий вид:

игольчатый

$$F = \pi h \sin \delta/2 \left(D - h \sin \frac{\delta}{2} \cos \frac{\delta}{2} \right), \quad (10.3a)$$

¹ Поверхность, по которой соприкасаются плунжер (золотник) и седло, называется опорной поверхностью, площадь щели между ними — проходным сечением F , внутренний диаметр поперечного сечения — в месте присоединения клапана к трубопроводу (по фланцу) — условным диаметром прохода клапана D_y . Значения D_y устанавливаются ГОСТ 356-67.

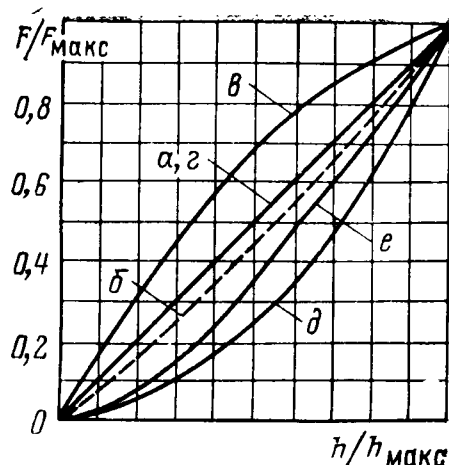


Рис. 10.4. Конструктивные характеристики клапанов:

а — тарельчатый; б — тарельчатый с конической опорной поверхностью; в — игольчатый ($\delta=30^\circ$); г — золотниковый с прямоугольными окнами; д — золотниковый с треугольными окнами; е — золотниковый с комбинированными окнами

при $\delta=15^\circ$

$$F = 0,41h(D - 0,13), \quad (h_{\text{макс}} = 3,78D);$$

тарельчатый

$$F = \pi Dh \quad (h_{\text{макс}} = 0,25D); \quad (10.36)$$

золотниковый с прямоугольным сечением окон

$$F = nbh, \quad (10.3в)$$

где n — число окон; b — ширина окна.

$$F = n \frac{b_{\text{макс}}}{2h_{\text{макс}}} h^2, \quad (10.3г)$$

где $b_{\text{макс}}$ — ширина основания треугольника.

Примеры конструктивных характеристик различных типов клапанов приведены на рис. 10.4.

Расчет регулирующих органов разделяется на конструктивный и поверочный.

При конструктивном расчете по заданной пропускной способности и условиям работы (параметрам среды) выбирается клапан из имеющихся типоразмеров серийной (стандартной) регулирующей арматуры.

Приближенный конструктивный расчет производится с учетом следующего ограничения: отношение площади прохода клапана $F_{\text{макс}}$, определенного из формул (10.1а) и (10.1б), к площади условного прохода $F_y = \pi D_y^2/4$ должно быть не более 0,6—0,7 ($F_{\text{макс}}/F_y \leq 0,6 \div 0,7$). Несоблюдение данного ограничения ведет к неэффективной работе клапана как регулирующего органа [14].

Цель поверочного расчета состоит в оценке максимальной пропускной способности клапана для определения диапазона регулирования и построения его рабочей расходной характеристики по заданному типоразмеру и известным условиям работы. Поверочный расчет проводится по исходным формулам расхода (10.1а) и (10.1б).

Максимальный расход для несжимаемой жидкости определяется по (10.1а) для $F_{\text{макс}}$, при этом коэффициент расхода $\mu_{\text{кл}}$ зависит от конструкции клапана и степени его открытия (рис. 10.5).

Для F , см², расход воды, т/ч,

$$G = 5,09 \cdot 10^{-4} \mu_{\text{кл}} F \sqrt{\Delta p \rho}. \quad (10.4)$$

Для Δp , кгс/см², и F , см², расход воды, кг/с,

$$G = 0,044 \mu_{\text{кл}} F \sqrt{\Delta p \rho}. \quad (10.5)$$

Для газа или пара расчет ведется с учетом поправки на расширение потока ϵ по формуле, кг/с,

$$G = \mu_{\text{кл}} F \epsilon \sqrt{\Delta p \rho}. \quad (10.6)$$

Для Δp , кг/см², и F , см², расход газа или пара, кг/с,

$$G = 0,044 \mu_{\text{кл}} F \epsilon \sqrt{\Delta p \rho}. \quad (10.7)$$

Значения ϵ подсчитываются по следующим формулам: для $\Delta p/p_n \leq 0,5$

$$\epsilon = 1 - \beta \Delta p/p_n; \quad (10.8)$$

для $\Delta p/p_n \geq 0,5$

$$\epsilon = 0,95 - (\beta - 0,1) \Delta p/p_n. \quad (10.9)$$

где p_n — абсолютное давление газа или пара перед клапаном. Для насыщенного водяного пара — 0,5; перегретого пара и трехатомных газов — 0,47; воздуха и двухатомных газов — 0,45.

Пример. Определить максимальную пропускную способность односедельного дроссельного клапана с заданной конструктивной характеристикой.

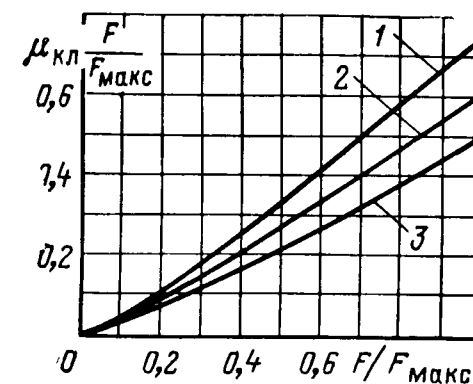


Рис. 10.5. Эффективное проходное сечение клапанов:

1 — игольчатые односедельные; 2 — игольчатые двухседельные и золотниковые; 3 — прочие

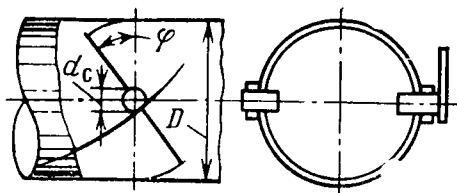
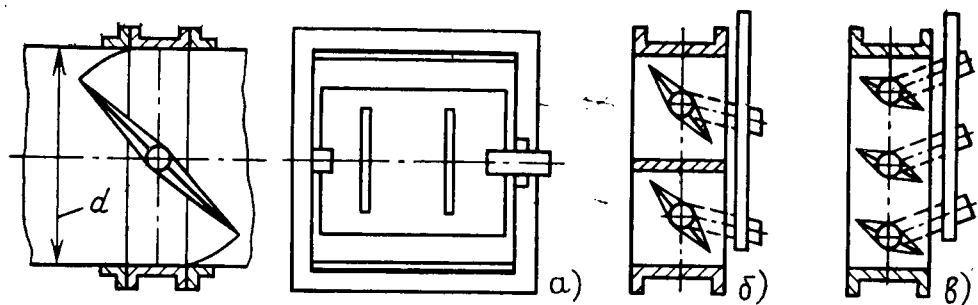


Рис. 10.6. Поворотная заслонка круглая

Рис. 10.7. Поворотные заслонки: а — прямоугольная проходная; б — двухлопастная с разделительной перегородкой; в — многолопастная



Дано: диаметр седла $D=2$ см; угол иглы $\delta=15^\circ$; располагаемый напор $\Delta p=0,5$ МПа (5 кгс/см²); перепад на клапане $\Delta p=0,2$ МПа (2 кгс/см²); регулируемая среда — вода при $t=150^\circ\text{C}$ [$\rho=91,7$ МПа (917 кг/см³)].

Расчет: 1) определение $F_{\text{макс}}$: $F_{\text{макс}}=\pi D^2/4=3,14$ см²; 2) определение $G_{\text{макс}}$: $G_{\text{макс}}=0,044 \mu_{\text{кл}} F \sqrt{\Delta p \rho}$; коэффициент расхода определяется по графику рис. 10.5 для $F/F_{\text{макс}}=1$; $\mu_{\text{кл}}=0,75$; $G_{\text{макс}}=0,044 \cdot 0,75 \cdot 3,14 \sqrt{2 \cdot 919}=4,4$ кг/с.

Дроссельные поворотные заслонки. Поворотные заслонки разделяются по форме поперечного сечения на круглые (рис. 10.6) и прямоугольные (рис. 10.7, а — в).

Круглые заслонки устанавливаются на трубопроводах и служат для регулирования расходов воды, пара, газа и воздуха при сравнительно малых перепадах давлений на регулирующем органе.

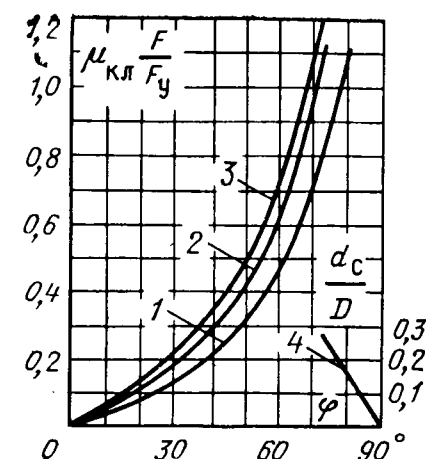
Заслонки прямоугольной формы могут быть однолопастными (рис. 10.7, а), двухлопастными с разделительной перегородкой, используемой для разделения потоков (рис. 10.7, б), и многолопастными (рис. 10.7, в). Последние чаще всего устанавливаются на газовых и воздушных коробах большого сечения при невысоких температурах потока. При регулировании расходов дымовых газов применяют многоосные литые чугунные заслонки. Конструктивные характеристики круглых заслонок определяются уравнением

$$F = 0,78 D_y^2 (1 - \cos \varphi), \quad (10.10)$$

где D_y — диаметр условного прохода круглой или равной по площади прямоугольной заслонки, численно равный

Рис. 10.8. Эффективное проходное сечение поворотных заслонок:

1 — однолопастные и многолопастные с разделительными перегородками (круглые и прямоугольные); 2 — двухлопастные; 3 — трехлопастные; 4 — зависимость $\Phi_{\text{макс}}$ от d_c/D



внутреннему диаметру круглой заслонки; φ — угол поворота заслонки (рис. 10.7, а), изменяющийся в пределах от 0 до

$$\Phi_{\text{макс}} = \arccos \frac{d_c}{D_y}, \quad (10.11)$$

где d_c — диаметр ступицы заслонки.

Максимальный расход, кг/с, через заслонку подсчитывается по формуле расхода для газа и пара

$$G_{\text{макс}} = 0,044 \mu_{\text{кл}} F_{\text{макс}} \varepsilon \sqrt{\Delta p \rho},$$

где $F_{\text{макс}}$ — максимальное открытие, соответствующее углу поворота $\varphi=\varphi_{\text{макс}}$.

Коэффициенты расхода (комплексная величина — $\mu_{\text{кл}} F_i/F_{\text{макс}}$) для заслонок показаны на рис. 10.8.

Минимальный расход при полном закрытии можно определить по формуле (10.5), приняв $\mu_{\text{кл}}=2 \div 3$; F — равным площади зазора между лопастью заслонки и внутренним диаметром трубопровода. Обычно кольцевой зазор принимают равным (0,002—0,005) D_y ; Δp — при полном закрытии берут максимальным.

10.4. РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОДАЧИ ТЯГОДУТЬЕВЫХ МАШИН И НАСОСОВ

Регулирование подачи дымососов и вентиляторов осуществляется следующими способами:

1) изменением частоты вращения машины посредством изменения частоты вращения электропривода — скоростное регулирование в соответствии с выражением

$$Q_1/Q_2 = n_1/n_2;$$

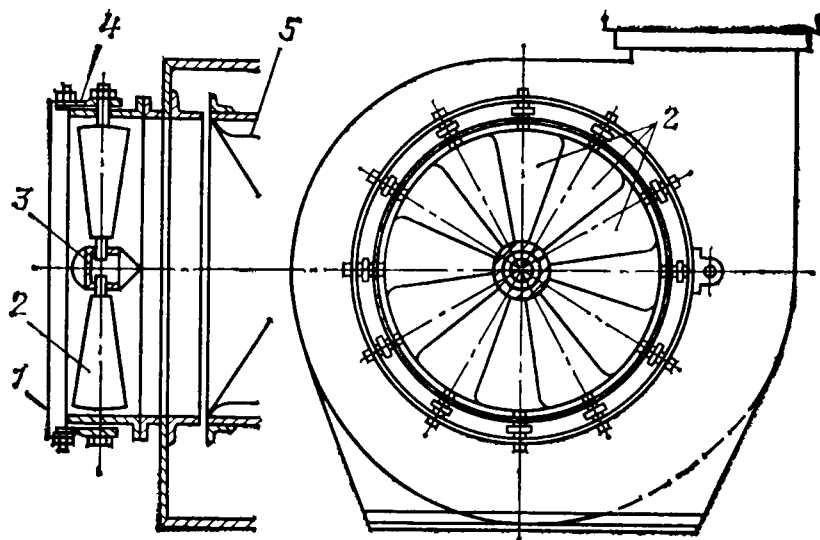


Рис. 10.9. Регулирование подачи дымососов и вентиляторов с помощью направляющего аппарата:

1 — кольцевой приводной рычаг; 2 — поворотные лопатки; 3 — опора; 4 — приводные промежуточные рычаги; 5 — крыльчатка дымососа или вентилятора

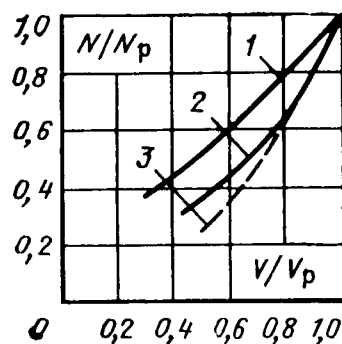


Рис. 10.10. Относительные потребляемые мощности при различных способах регулирования подачи тягодутьевых машин:

1 — дроссельное регулирование; 2 — направляющий аппарат; 3 — скоростное регулирование

2) дросселированием и одновременным изменением направления потока с помощью направляющих аппаратов — *смешанное* регулирование.

Схематическое изображение направляющего аппарата в двух проекциях приведено на рис. 10.9. В положениях, близких к полному закрытию, изменение расхода газа или воздуха осуществляется в основном за счет дросселирования. В дальнейшем по мере открытия и увеличения угла поворота лопаток изменение подачи достигается частично дросселированием, а также изменением направления потока по отношению к лопастям рабочего колеса дымососа или вентилятора.

При сравнении различных способов регулирования подачи дымососов и вентиляторов следует учитывать такие факторы, как экономичность, надежность и простоту кон-

струкции. С точки зрения затрат электроэнергии на привод при одинаковой подаче наиболее экономичным является скоростное регулирование, наименее экономичным — дроссельное, осуществляемое с поворотными заслонками и шиберами. Последние, однако, наиболее надежны и просты по конструкции.

На рис. 10.10. приводятся графики относительных потребляемых мощностей (N/N_p) электропривода для рассмотренных способов регулирования.

При регулировании подачи мощных тягодутьевых машин широко используются направляющие аппараты, превосходящие поворотные заслонки по экономичности, но несколько уступающие им по надежности, в особенности при высоких температурах потока.

10.5. РЕГУЛИРУЮЩИЕ ОРГАНЫ ПОДАЧИ ТОПЛИВА

Регулирование расхода жидкого или газообразного топлива, поступающего в топку парового котла, осуществляется клапанами или поворотными заслонками, устройство которых рассматривалось в § 10.2 и 10.3.

При сжигании твердого топлива (каменный уголь, торф или сланец) для регулирования его подачи в топку и изменения расхода применяются специальные питатели топлива.

Питатели твердого топлива. Они используются в качестве топливоподающих устройств барабанных или молотковых мельниц.

Тарельчатый питатель схематически изображен на рис. 10.11. Предварительно раздробленное сырое топливо из бункера через цилиндрическую трубу 1 поступает на вращающийся диск (тарелку) 2 и сбрасывается с него поворотным ножом 3 в отводящую трубу 4. Изменение количества топлива, подаваемого в мельницу, можно регулировать тремя способами: 1) изменением высоты положения приемной трубы 1 над рабочим диском 2; 2) изменением угла поворота ножа 3, открывающего топливу доступ в трубу 4; 3) изменением частоты вращения электропривода тарелки 2.

Первый способ используется для первоначальной установки высоты трубы над тарелкой в зависимости от угла естественного откоса сырого топлива. Второй способ используется при индивидуальном регулировании подачи топлива в мельницы. В этом случае изменение положения регулирующего органа осуществляется с помощью сервопривода, сочлененного с поворотной осью ножа. Третий способ целесообразно использовать при групповом регулировании подачи топлива

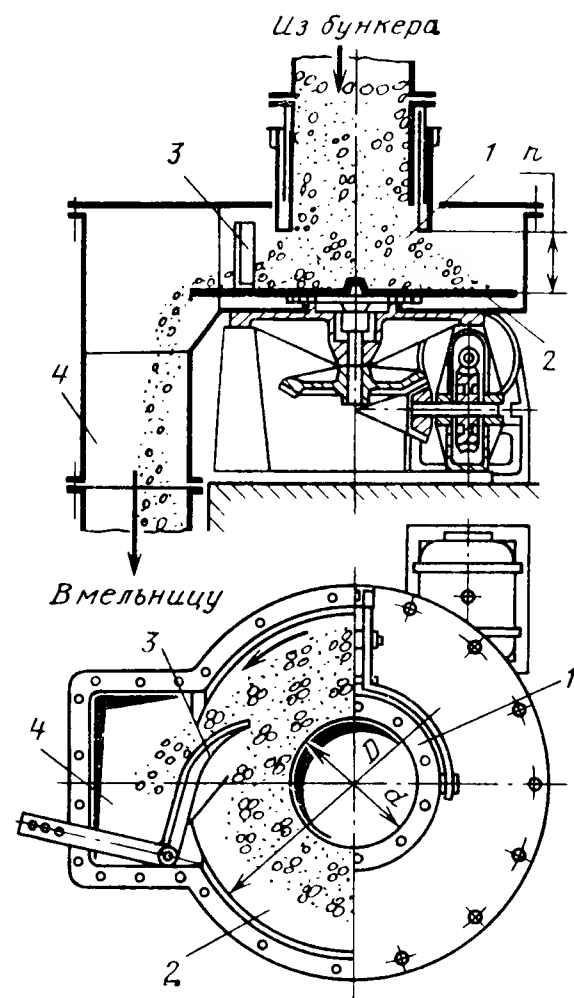


Рис. 10.11. Тарельчатый питатель сырого угля

в мельницы. Тарельчатые питатели рассчитаны на расход сырого топлива от 5 до 30 т/ч или от 1 до 8 кг/с.

Ленточный питатель приведен на рис. 1.32. Устройством, дозирующим подачу топлива из бункера 1 в приемную трубу 2, служит полотно ленточного транспортера 3, движущееся с переменной или постоянной скоростью. Регулирование расхода топлива можно осуществлять двумя способами: изменением толщины слоя топлива за счет изменения положения секторного ножа или шибера 4; изменением скорости движения ленты за счет изменения частоты вращения электропривода.

Первый способ чаще применяется при индивидуальном управлении подачей топлива в мельницы, второй — при групповом. Для ленточного питателя расход сырого топлива, т/ч,

$$G = Fv\rho,$$

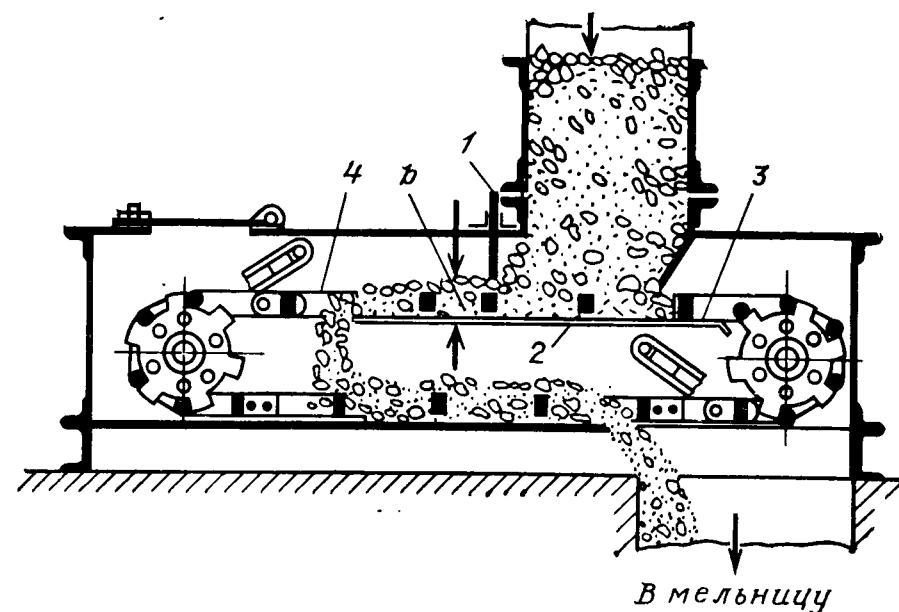


Рис. 10.12. Скребковый питатель сырого угля

или

$$G \approx abv\rho, \quad (10.12)$$

где a — ширина слоя топлива (приблизительно равная ширине щели бункера сырого угля $a=0,3\div0,5$); b — средняя толщина слоя топлива ($b_{\text{макс}}=0,10\div0,15$ м; $b_{\text{мин}}=0,03\div0,04$ м); v — скорость ленты, м/ч (обычно $v=360\div1080$ м/ч); ρ — средняя плотность сыпучего материала (топлива).

Скребковый питатель изображен на рис. 10.12. Подача топлива осуществляется с помощью движущейся по полотну 2 цепи 3 с укрепленными на ней скребками 4. Сырое топливо из бункера поступает на верхнее полотно 2 через щель, площадь живого сечения которой регулируется положением шибера 1. Затем топливо скребками сбрасывается на нижнее полотно, с которого также скребками сбрасывается в приемную трубу мельницы. Расход топлива, так же как и у ленточного питателя, может регулироваться положением шибера 1 или изменением скорости движения цепи. Последний способ наиболее целесообразен при групповом управлении питателями и высоковлажном топливе в системах с индивидуальным управлением производительностью мельниц.

При сравнительной оценке рассмотренных конструкций питателей сырого угля следует учитывать сорт топлива, качество его предварительной обработки (дробление и очистка) и назначение питателя в системе регулирования.

Тарельчатые питатели имеют малые габариты и наименьшие присосы воздуха в систему пылеприготовления.

Но их подача при неизменных положении ножа и частоте вращения диска зависит от влажности топлива и качества его предварительной обработки. При попадании в бункер порции сильно увлажненного топлива возможно проскальзывание топливного слоя относительно вращающегося диска. Попадание инородных тел и предметов (щепа, ветошь, камни и т. п.) между нижней кромкой ножа и диском может привести к чрезмерной перегрузке электропривода («заеданию») и его останову. В связи с этим тарельчатые питатели обычно устанавливаются на системах приготовления пылевидного топлива с промежуточным бункером, где нестабильность топливоподачи в мельницы не приводит к глубоким нарушениям топочного режима котла.

Ленточный питатель лишен недостатков тарельчатого («заедания», остановки), но в той же мере лишен и его преимуществ (малые габариты и присосы воздуха). Питатели ленточного типа устанавливаются для непрерывного взвешивания поступающего в мельницу топлива, поскольку единственным хорошо освоенным способом измерения расхода твердого топлива служит взвешивание на ленте. Область применения ленточных питателей — индивидуальное регулирование подачи топлива в шаровые барабанные и групповое — в молотковые мельницы.

Необходимость установки более сложных по конструкции скребковых питателей вызывается наличием высоковлажных топлив (торфа, бурых углей, сланца), когда другие способы дозировки оказываются ненадежными. В питателях данного типа захват топлива осуществляется с помощью скребков в устье приемной трубы, что исключает проскальзывание слоя топлива относительно движущейся части питателя. Однако скребковые питатели в силу конструктивных особенностей обладают сравнительно большим (до 30 % максимального) нерегулируемым пропуском сырого топлива в мельницу.

Питатели пылевидного топлива. Для регулирования подачи пыли в топку парового котла применяются пылепитатели.

Шнековый питатель (рис. 10.13) действует по принципу «винта». Винт, называемый шнеком, остается на месте, а перемещается сыпучая среда, в которой он вращается.

Пыль из промежуточного бункера 1 через отсечный шибер 2 непрерывно поступает в приемный патрубок питателя 4, проталкивается винтовой лопастью шнека 3 до выходного патрубка и стекает через точку пыли 5 в пылепровод 6, где она подхватывается потоком воздуха и транспортируется до горелки 7, через которую и поступает

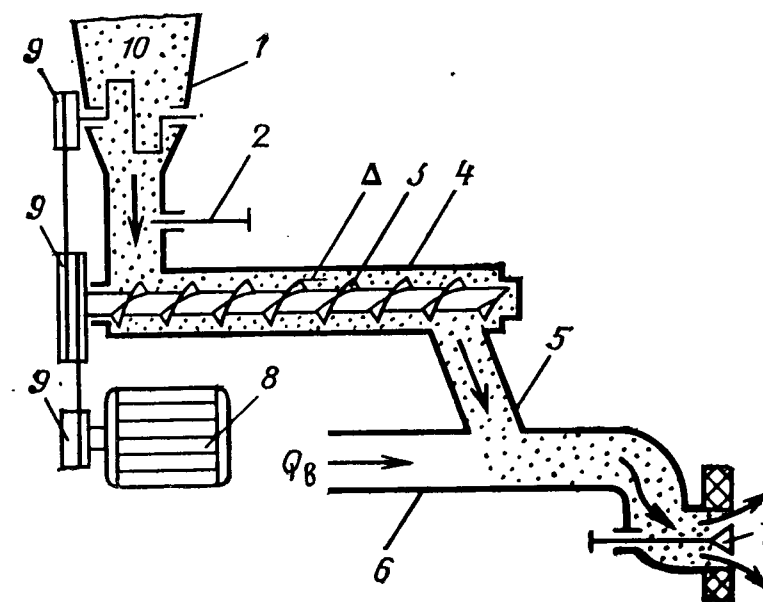


Рис. 10.13. Шнековый питатель пыли

в топку. Подача питателя такой конструкции регулируется частотой вращения шнека. Для этой цели используется электропривод с регулируемой частотой вращения, как правило, двигатель постоянного тока 8, который связывается с валом шнека ременной передачей 9. Для предотвращения образования сводов над входной горловиной питателя можно устанавливать «ворошитель» 10.

Диапазон изменения частоты вращения электропривода $n = 450 \div 1350$ об/мин. Так как электропривод имеет определенную начальную частоту вращения, шнековый питатель обладает нерегулируемой начальной подачей (до 30 % максимальной).

Рабочая характеристика шнекового питателя может изменяться в зависимости от тонины помола пыли, ее влажности и высоты столба пыли над приемным патрубком шнека. Некоторое количество пыли может попадать в топку парового котла при остановленном питателе за счет эжектирующего действия потока воздуха в пылепроводе и из-за протекания пыли через зазоры между лопастями шнека 9 и корпусом питателя 4. Это явление имеет место при сухой и тонкой пыли, обладающей высокой текучестью.

Дисковый питатель, принцип действия которого показан на рис. 10.14. Питатель состоит из двух вращающихся дисков с укрепленными на них лопастями. Пыль из бункера, приводимая в движение ворошителем 2, поступает в приемную горловину 1, а оттуда через окно верхней перегородки 3 в ячейку между лопастями вращающегося верхнего диска 4, которым она перемещается на другой край средней перегородки, проваливается через окно в ячейку между лопастями нижнего диска 5 и переваливается ими на правый край

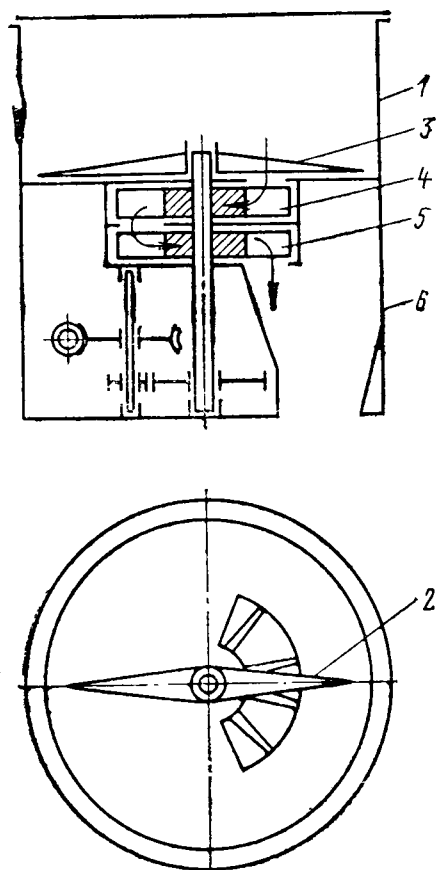


Рис. 10.14. Дискový пита-
тель пыли

«заедает» при попадании посторонних предметов в зазор между лопастями дисков и перегородками, поэтому приемные патрубки питателей защищаются сетками.

Для шнековых питателей попадание посторонних предметов практически не опасно. Они более просты по конструкции, легко ремонтируются. Однако их не рекомендуется устанавливать при наличии сухого топлива (с влажностью менее 12—14 %). При использовании топлива с повышенной влажностью образование сводов над приемным патрубком шнека можно частично предотвратить увеличением площади живого сечения приемного патрубка и установкой ворошителя.

10.6. СОЧЛЕНЕНИЕ РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ С ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ

Помимо прямой связи силового элемента исполнительного механизма с регулирующим органом, осуществляемой, например, в сервоприводе мембранного типа (см. рис. 6.8),

нижней перегородки, откуда она проваливается через окно в приемную трубу 6, соединяющую питатель пыли с пылеприводом. Путь, совершаемый сыпучей массой за один оборот дисков, показан стрелкой. Подача дискового питателя регулируется частотой вращения электропривода с редуктором, на выходном валу которого укреплены вращающиеся диски. Диапазон регулирования дискового питателя по частоте вращения одинаков с диапазоном шнекового. Дискový питатель также имеет определенную нерегулируемую начальную производительность, которую можно изменять перекрытием части окна верхней перегородки 3.

При сравнении рассмотренных конструкций питателей пыли следует учитывать сорт сжигаемого топлива. Иногда применение дискового питателя служит единственным способом устранения нерегулируемого перетока пыли из бункера по пылепроводам в топку. В то же время питатель

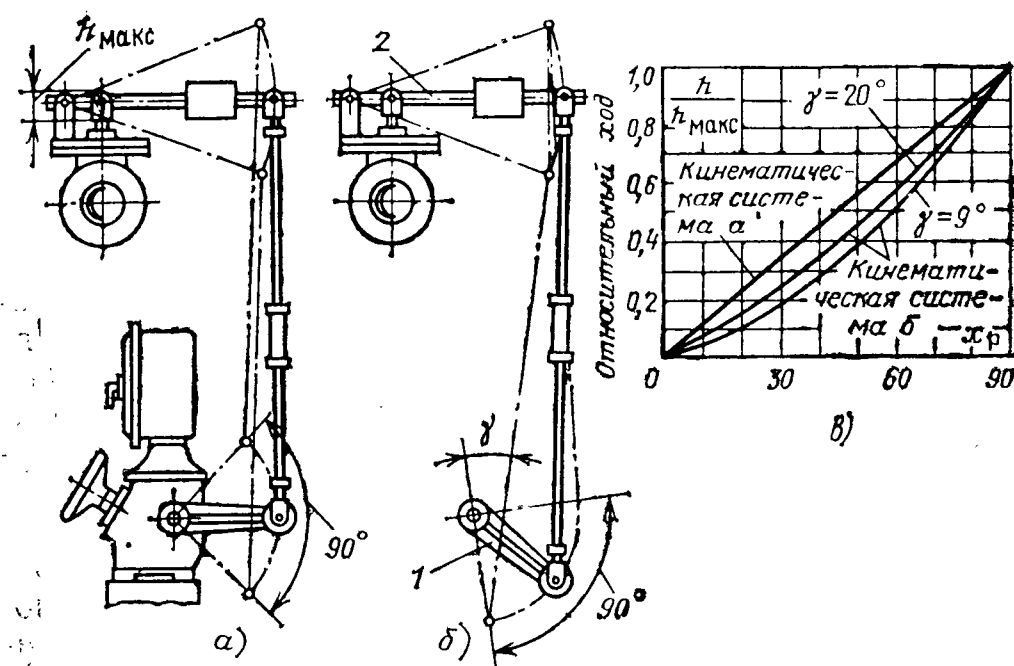


Рис. 10.15. Рычажное сочленение регулирующего органа с сервоприводом:

а — с линейной характеристикой; б — с нелинейной характеристикой; в — статические характеристики сочленений а и б

существуют следующие виды сочленений: рычажное, кулачковое, редукторное, тросовое.

В большинстве случаев в промышленных автоматических системах рабочая характеристика регулирующего органа должна быть линейной в координатах: положение выходного рычага сервопривода x_p — расход регулируемой среды Q . Если нелинейность рабочей характеристики регулирующего органа неизбежна или неустранима, то она может быть компенсирована конструкцией сочленения.

Рычажное сочленение представляет собой устройство, кинематическая схема которого с линейной характеристикой приведена на рис. 10.15, а, с нелинейной статической характеристикой — на рис. 10.15, б. На рис. 10.15, в приведены статические характеристики $h/h_{\max} = f(x_{p.0})$ сочленений, показанных на рис. 10.15, а и б. Рычажные сочленения просты по конструкции и надежны в эксплуатации, но применяются только в том случае, когда поворот выходного рычага сервопривода 1 и приводного рычага 2 регулирующего органа осуществляется в одной плоскости, и при условии, что угол поворота выходного рычага, равный 90° , обеспечивает максимальное открытие регулирующего органа. Применение рычажного соединения ограничивается так-

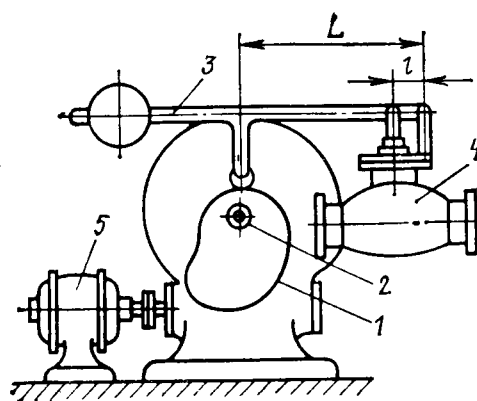


Рис. 10.16. Кулачковое сочленение:

1 — кулачок; 2 — выходной вал сервопривода; 3 — приводной рычаг; 4 — клапан; 5 — электродвигатель

же расстоянием между сервоприводом и регулирующим органом.

Кулачковое сочленение (рис. 10.16) позволяет использовать сервоприводы с углом поворота выходного вала до 360° , при этом плоскости вращения кулачка и приводного рычага регулирующего органа могут не совпадать. Существенным преимуществом кулачкового соединения служит возможность изменения характеристики сочленения в широких пределах путем различного

профилирования кулачка. Это позволяет добиться линейности характеристики регулирующего органа в координатах угол поворота выходного вала сервопривода φ_p — расход регулируемой среды Q^* при любом виде рабочей характеристики в координатах $G-h$. Кулачковые сочленения применяют при сравнительно небольших перестановочных усилиях и совместном расположении сервопривода и регулирующего органа.

Редукторное сочленение электрического сервопривода с регулирующим органом применяется в случае больших перестановочных усилий при перемещениях регулирующего или запорного органа (например, при регулировании питания водой мощных паровых котлов высокого и сверхвысокого давления). Угол поворота выходного вала редуктора, понижающего частоту вращения, практически не ограничен, его передаточные характеристики линейны.

Тросовое соединение в случае необходимости позволяет устанавливать сервопривод на более значительном расстоянии от регулирующего органа по сравнению с рычажным, но все же это расстояние ограничивается вытяжкой троса. Угол поворота выходного вала сервопривода при тросовом соединении может изменяться от 0 до 270° . Повороты диска, укрепленного на выходном валу, и приводного рычага регулирующего органа могут совершаться в различных плоскостях. Требуемую расходную характеристику регулирующего органа в случае тросовой связи можно осуществить, изменяя профиль приводного диска. Для надежности сочленения соединительный трос прокладывается в защитных трубах.

Контрольные вопросы

1. Поясните технологическую схему выработки электроэнергии на ТЭС и назначение АСР парового котла, турбины и генератора.
2. Назовите основные регулируемые величины тепловой части ТЭС.
3. Назовите регулирующие органы дроссельного типа, применяемые на ТЭС, перечислите типы дроссельных клапанов и заслонок.
4. Что называется рабочей и конструктивной характеристиками дроссельного органа?
5. Как регулируется подача тягодутьевых машин на ТЭС?
6. Как регулируется подача твердого топлива в мельницы на ТЭС?
7. Какие устройства используются для регулирования подачи пылевидного топлива в топку?
8. Какие сочленения исполнительных механизмов с регулирующими органами используются на ТЭС?

Глава одиннадцатая

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

11.1. БАРАБАННЫЙ ПАРОВОЙ КОТЕЛ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Принципиальная технологическая схема барабанного котла показана на рис. 11.1. Паровой котел в целом по каналу топливо — расход или давление пара служит системой направленного действия. Однако выходные регулируемые величины некоторых участков служат одновременно входными по отношению к другим. Например, расход перегретого пара $D_{п.п.}$, являясь выходной величиной по отношению к расходу топлива B_t , служит входным воздействием по отношению к давлению и температуре перегретого пара: давление пара в барабане p_b , являясь выходной величиной по отношению к расходу топлива, служит одним из входных воздействий участка регулирования уровня воды в барабане H_b .

Паровой котел как объект управления представляет собой сложную динамическую систему с несколькими взаимосвязанными входными и выходными величинами (рис. 11.2). Однако явно выраженная направленность участков регули-

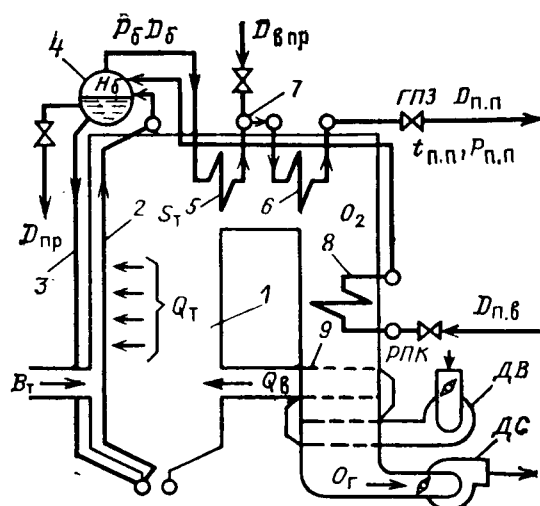


Рис. 11.1. Принципиальная технологическая схема барабанного парового котла

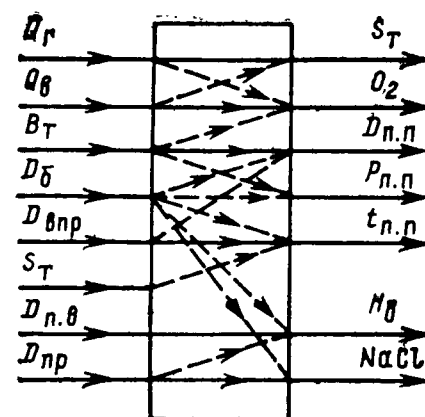


Рис. 11.2. Схема взаимосвязей между выходными и входными величинами в барабанном котле

рования по основным каналам регулирующих воздействий, таким как расход питательной воды $D_{п.в}$ — уровень H_6 , расход воды на впрыск $D_{впр}$ — перегрев $t_{п.п}$, расход топлива B_t — давление $p_{п.п}$ и др. позволяет осуществлять стабилизацию регулируемых величин с помощью независимых одноконтурных систем, связанных лишь через объект управления. При этом регулирующее воздействие того или иного участка (сплошные линии на рис. 11.2) служит основным способом стабилизации регулируемой величины, а другие воздействия (пунктирные линии) считаются по отношению к этому участку внутренними или внешними возмущениями.

Управляемый процесс парообразования происходит в подъемных трубах циркуляционного контура 2, снабжающихся водой из опускных труб 3 и экранирующих камерную топку 1, в которой сжигается топливо B_t . Для поддержания процесса горения с заданным коэффициентом избытка α в топку нагнетается вентилятором ДВ воздух Q_v , предварительно нагретый в воздухоподогревателе 9.

Дымовые газы Q_r , образовавшиеся в результате процесса горения, отсасываются из топки дымососом ДС. Они проходят через поверхности нагрева экономайзера 8, воздухонагревателя 9 и удаляются в атмосферу через дымовую трубу. Насыщенный пар из барабана 4 поступает в пароперегреватель 5, 6, где перегревается до требуемой температуры за счет радиации факела и конвективного обогрева топочными газами.

Основные регулируемые величины котла — расход перегретого пара $D_{п.п}$, давление $p_{п.п}$ и температура $t_{п.п}$.

При этом расход пара может изменяться в широком диапазоне, а давление и температура поддерживаются в сравнительно узких пределах допустимых отклонений, что обуславливается требованиями заданного режима работы турбины или иного потребителя теплоты.

Температура перегрева пара может поддерживаться вблизи заданного значения, например, посредством изменения расхода охлаждающей воды $D_{впр}$ на пароохладитель 7. Давление пара отклоняется от заданного значения во всех случаях небаланса между количествами потребляемого пара $D_{п.п}$ и генерируемого (вырабатываемого) в экранных трубах D_6 . Небаланс устраняется посредством регулирования тепловыделения в топке, главным образом изменением подачи топлива. Кроме названных, следует поддерживать в пределах допустимых отклонений следующие величины: уровень воды в барабане H_6 (регулируется изменением подачи питательной воды $D_{п.в}$); разрежение в верхней части топки S_t (регулируется изменением производительности дымососов, отсасывающих дымовые газы из топки); оптимальный избыток воздуха за пароперегревателем α (регулируется изменением производительности дутьевых вентиляторов, нагнетающих воздух в топку); солесодержание котловой воды в пересчете на NaCl (регулируется изменением расхода воды $D_{пр}$, выпускаемой из барабана в сепаратор непрерывной продувки).

Система автоматического регулирования барабанного парового котла в целом состоит из отдельных замкнутых систем: 1) давления перегретого пара $p_{п.п}$ и тепловой нагрузки D_q ; 2) избытка воздуха в топке, определяемого содержанием O_2 за пароперегревателем, — экономичности процесса горения; 3) разрежения в верхней части топки S_t ; 4) температуры перегрева пара; 5) питания котловой воды; 6) качества котловой воды.

11.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПАРА И ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ БАРАБАННОГО КОТЛА

Характеристика участка регулирования. Паровой котел как объект управления тепловой нагрузки может быть представлен в виде последовательного соединения более простых участков, разграниченных конструктивно (см. рис. 11.1): топочной камеры; испарительной или парообразующей части, состоящей из поверхностей нагрева, расположенных к топочной камере; барабана и пароперегревателя. Динамические свойства каждого из этих участков и котла в целом по каналу расход топлива B_t — давление перегретого пара $p_{п.п}$ описываются линейными дифференциальными уравнениями типа (2.21) и кривыми разгона, приведенными на рис. 2.5, а.

Рассмотрим динамику испарительного участка, в котором вода нагревается до температуры кипения и протекает процесс парообразования. Изменение тепловыделения Q'_T приводит к изменению паропроизводительности D_6 и давления пара в барабане p_6 (см. рис. 11.1). Если прирост расхода топлива и тепловыделения идет целиком на нагрев пароводяной смеси и металла парообразующей части, то скорость изменения давления dp_6/dt будет прямо пропорциональна теплоте, затраченной на нагрев пароводяной смеси, или разности между воспринятым и ушедшим с паром количествами теплоты:

$$\frac{A dp_6(t)}{dt} = Q'_T - D_6 (h_H - h_{П.В}), \quad (11.1)$$

где A — размерный коэффициент, характеризующий тепловую аккумулирующую способность пароводяной смеси и металла испарительной части; h_H — энтальпия насыщенного пара на выходе из барабана; $h_{П.В}$ — энтальпия питательной воды.

Разделив правую и левую части уравнения (11.1) на $(h_H - h_{П.В})$, получим его вторую форму записи, более удобную для сопоставления экспериментальных и расчетных данных:

$$\frac{A}{h_H - h_{П.В}} \frac{dp_6(t)}{dt} = \frac{Q'_T}{h_H - h_{П.В}} - D_6 \quad (11.2)$$

или

$$C_{\Pi} \frac{dp_6(t)}{dt} = D_q - D_6,$$

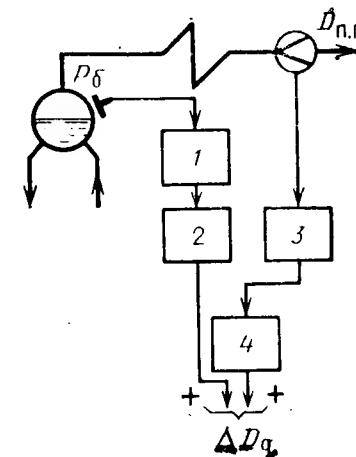
где C_{Π} — постоянная, характеризующая массовую аккумулирующую способность пароводяной смеси и металла труб и барабана котла, $\text{кг}/(\text{кгс}/\text{см}^2)$; $D_q = Q'_T / (h_H - h_{П.В})$, $\text{кг}/\text{с}$, — тепловая нагрузка, характеризующая тепловосприятие испарительных поверхностей в единицу времени, выраженная в единицах расхода пара.

Непрерывный способ косвенного измерения D_q основан на использовании зависимости (11.2), из которой следует, что

$$\Delta D_q = C_{\Pi} \frac{dp_6(t)}{dt} \pm \Delta D_6. \quad (11.3)$$

Принципиальная схема измерения D_q , называемого в дальнейшем сигналом по теплоте*, приводится на рис. 11.3. Экспериментальные кривые переходных процессов парового котла 420 т/ч типа ТП-87 по давлению, расходу пара и результирующая кривая по теплоте D_q при нанесении возмущения топливом и регулирующими клапанами приводятся на рис. 11.4. Однако сигнал по теплоте при всей его

Рис. 11.3. Формирование сигнала по теплоте: 1 — датчик давления пара; 2 — дифференциатор; 3 — датчик расхода пара; 4 — измерительный блок регулирующего прибора



простоте и надежности измерения обладает недостатками: зависит от расхода воды на впрыск в паропровод свежего пара и с относительно большим запаздыванием реагирует на изменение тепловыделения в топке по каналам неконтролируемых возмущений (качество топлива, неравномерность работы топливopодводящих устройств, колебания расхода первичного воздуха и др.).

На рис. 11.5, а приведена принципиальная схема формирования сигнала по сопротивлению циркуляционного контура котла¹ (тепловосприятию) Δp_q , так же как и ΔD_q , косвенно оценивающего изменение тепловыделения в топке, но лишенного недостатков сигнала по теплоте [15].

Отборные устройства для измерения усредненных статических напоров устанавливаются на перепускных трубах

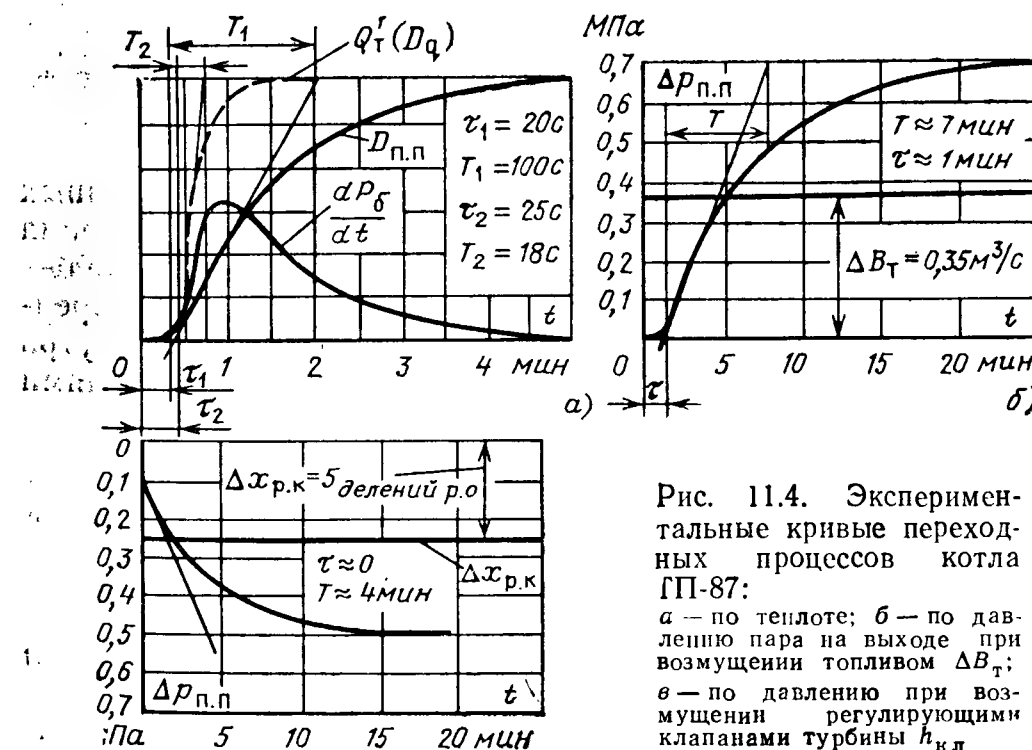


Рис. 11.4. Экспериментальные кривые переходных процессов котла ТП-87: а — по теплоте; б — по давлению пара на выходе при возмущении топливом ΔB_T ; в — по давлению при возмущении регулирующими клапанами турбины $h_{кл}$

* Предложен ЦКТИ им. И. И. Ползунова в 1953 г.

¹ Предложен МЭИ в 1978 г.

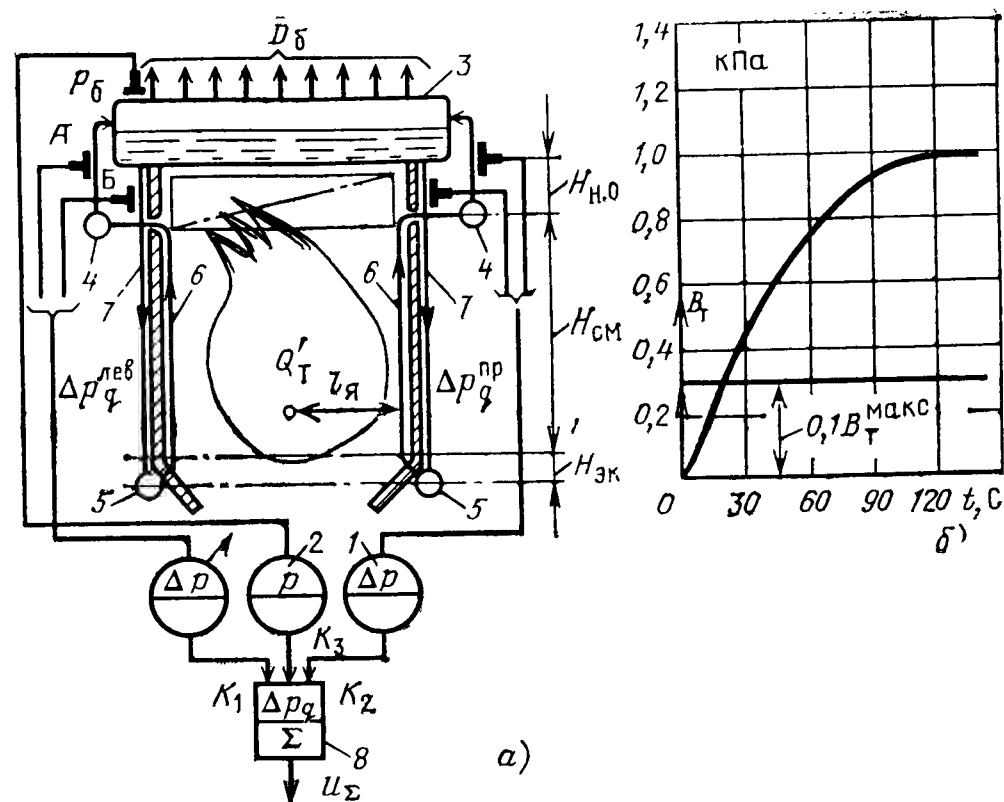


Рис. 11.5. Формирование сигнала по тепловосприятию:

а — схема формирования сигнала по Δp_q : 1 — датчик перепадов давлений в циркуляционном контуре; 2 — датчик по давлению пара в барабане; 3 — барабан; 4 — сборный коллектор подъемных труб; 5 — коллектор опускных труб; 6, 7 — подъемные и опускные трубы; 8 — измерительный блок регулятора; б — экспериментальная кривая переходного процесса по Δp_q для котла типа ТП-101

между сборными коллекторами средних боковых экранных панелей и барабаном. Отборные устройства для измерения полных напоров устанавливаются на расстоянии 800—1000 мм от днища барабана в опускных трубах. Они представляют собой импульсные трубки, заведенные внутрь опускной трубы и обращенные приемными отверстиями навстречу потоку.

Движущий напор между точками А и Б одиночного контура циркуляции, вызывающий естественное обращение котловой воды в опускных и подъемных трубах, приближенно определяется выражением [15]

$$\Delta p_c = H_{cm} (\rho'_{оп} - \bar{\rho}_{cm}) - \Delta p_{г.с}, \quad (11.4)$$

где Δp_c — разность статических напоров; $\Delta p_{г.с}$ — перепад, обусловленный гидравлическим сопротивлением одиночного контура; H_{cm} — длина участка пароводяной смеси на подъемной трубе; $\rho'_{оп}$, $\bar{\rho}_{cm}$ —

усредненные плотности воды и пароводяной смеси в опускной и подъемной трубах.

Для увеличения чувствительности сигнала Δp_c в статике и динамике к внутритопочным возмущениям измеряют полный напор среды в опускной трубе, характеризуемый добавочной составляющей по скорости движения воды ω_0 :

$$\rho'_{оп} \omega_0^2 / 2g. \quad (11.5)$$

В результате численное значение сигнала в целом определится выражением

$$\Delta p_q = H_{cm} (\rho'_{cm} - \bar{\rho}_{cm}) + \frac{\omega_0^2 \rho'_{оп}}{2g} - \Delta p_{г.с}. \quad (11.6)$$

Величины H_{cm} , ρ , ω в (11.7) зависят от количества теплоты, воспринимаемой экраном $Q_{эк}$ и определяемой расстоянием соответствующей экранной поверхности до ядра факела $l_{я}$; величины H_{cm} и ρ — от давления пара в барабане p_b . Для того чтобы однозначно оценить тепловыделение в топке с помощью сигнала по Δp_q , необходимо ввести в него коррекцию по $l_{я}$ и компенсацию по p_b . Устранение влияния смещения факела по ширине топки на численное значение сигнала достигается путем измерения Δp_q с двух противоположных сторон факела.

Численное значение сигналов Δp_q , измеряемых в двух средних боковых противоположных панелях и суммируемых в измерительном блоке, определяется следующим выражением:

$$U_{\Sigma} = K_1 U_1 + K_2 U_2 = K_1 \left(U_1 + \frac{K_2}{K_1} U_2 \right), \quad (11.7)$$

где U_1 , U_2 — значения сигналов, полученных на выходе первичных функциональных преобразователей; K_1 , K_2 — заданные массовые коэффициенты по каналам измерений U_1 и U_2 .

При смещении факела от $l_{я}$ в сторону того или иного экрана на $\pm \Delta l$ интенсивность облучения одного экрана возрастает, второго — падает. Соответственно численное значение первого сигнала U_1 увеличивается на $+\Delta U_1$, второго — уменьшается на $-\Delta U_2$. В то же время среднее значение суммы двух сигналов, определяемое формулой (11.8), должно быть неизменным для достижения независимости от смещения факела. Последнее условие выполняется настройкой переменных коэффициентов k_1 и k_2 , определяемых из выражения

$$U_{\Sigma} = k_1 u_1 + k_2 u_2 = k_1 (u_1 + \Delta u_1) + k_2 (u_2 - \Delta u_2),$$

откуда

$$k_1 \Delta u_1 - k_2 \Delta u_2 = 0 \quad (11.8)$$

$$k_2/k_1 = \Delta u_1/\Delta u_2. \quad (11.9)$$

При заданном k_1 , например $k_1=1$, получим

$$k_2 = \Delta u_1/\Delta u_2.$$

Следовательно, суммирование сигналов с заданными массовыми коэффициентами, полученными из условия (11.9), позволяет сформировать сигнал, независимый от $l_{\text{я}}$. Опыты по смещению факела осуществляются путем одновременного включения и отключения крайних горелок по ширине топки или же путем соответствующего увеличения и уменьшения поступающего по ним топлива.

Компенсация сигнала Δp_q по давлению пара в барабане также осуществляется опытным путем. Для этого, воздействуя на ручку настройки k_3 (см. рис. 11.4, а), следует добиваться неизменности результирующего сигнала при изменениях давления пара в барабане p_6 за счет изменения положения регулирующих клапанов турбины при постоянстве паровой нагрузки на котел и тепловыделения в топке. Численное значение результирующего сигнала Δp_q , скорректированного по давлению пара в барабане и подаваемого совместно с сигналом задания по нагрузке на автоматический регулятор расхода топлива или воздух, определяется из выражения

$$\Delta p_q = K_1 U_1 + K_2 U_2 + K_3 U_3 + U_0, \quad (11.10)$$

где K_1 , K_2 , U_1 и U_2 — то же, что и в формуле (11.8); U_3 — численное значение сигнала по давлению пара в барабане на выходе первичного преобразователя; K_3 — численное значение весового коэффициента по каналу давления пара в барабане, определенное из условия независимости Δp_q от p_6 ; U_0 — сигнал задания по нагрузке парового котла.

Кривая разгона сигнала Δp_q при возмущении топливом приведена на рис. 11.5, б.

Способы и схемы регулирования. Существующие способы и схемы автоматического регулирования тепловой нагрузки парового котла и давления пара в магистрали основаны на принципах регулирования по отклонению и возмущению или же комбинации того и другого и определяются: заданным режимом работы котла (базовым или регулирующим) и схемой подсоединения паропровода перегретого пара к потребителю (турбине).

Базовым режимом называют режим поддержания паровой нагрузки котла на заданном уровне вне зависимости от изменения общей электрической или тепловой нагрузки ТЭС.

В *регулирующем* режиме паровой котел воспринимает колебания тепловой и электрической нагрузок турбин, т. е.

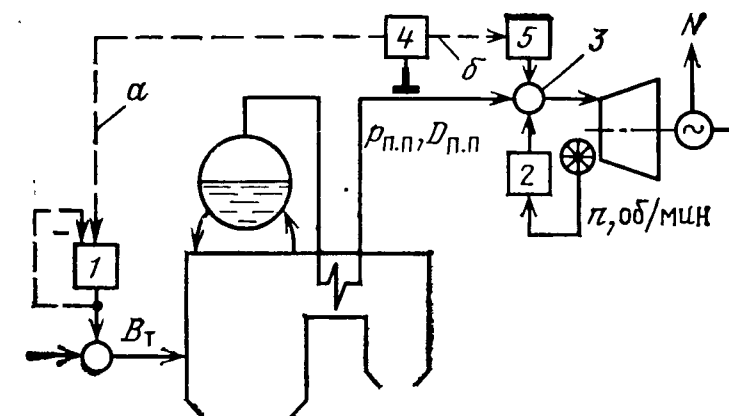


Рис. 11.6. Принципиальная схема регулирования давления пара перед турбиной

участвует в регулировании общей тепловой и электрической нагрузок станции. При этом один котел может быть подключен только к одной турбине (блочная схема) или к общей паровой магистрали, объединяющей группу котлов и турбин (схема с общим паропроводом)

1. Регулирование энергоблока паровой котел — турбина. Главным способом регулирования давления пара в регулирующем режиме служит воздействие на расход топлива, подаваемого в топку. Принципиальная схема замкнутой АСР давления пара перед турбиной изображена на рис. 11.6 (вариант а). Давление пара поддерживается регулятором давления 4, воздействующим на регулятор подачи топлива в топку 1, а частота вращения ротора турбины — регулятором скорости 2. В базовом режиме воздействие регулятора давления 4 переключается на регулирующие клапаны турбины 3 через электропривод синхронизатора турбины 5 (рис. 11.6, вариант б).

2. Регулирование группы паровых котлов, соединенных общим паропроводом. Схема с главным регулятором.

Принципиальная схема регулирования давления перегретого пара для случая параллельной работы котлов, так называемая схема с главным регулятором, изображена на рис. 11.7.

Доля участия каждого котла в суммарной паровой нагрузке изменяется степенью отрицательной обратной связи по положению РО, исходная нагрузка устанавливается задатчиками ручного управления ЗРУ.

Недостаток схемы с главным регулятором проявляется при возмущении со стороны подачи топлива, например при нарушении нормальной работы топливоподающих устройств одного или двух агрегатов (останов одного или группы

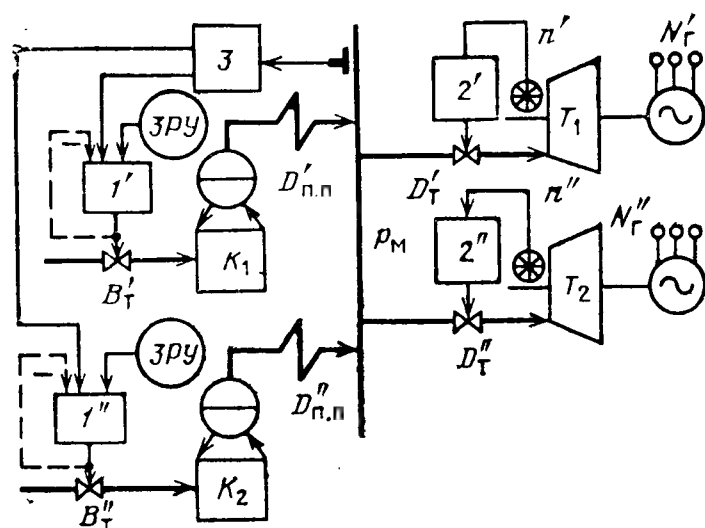


Рис. 11.7. Принципиальная схема регулирования давления пара в общем паропроводе с главным регулятором:

1', 1'' — регуляторы подачи топлива; 2', 2'' — регуляторы частоты вращения турбины; 3 — главный регулятор давления пара; K₁, K₂ — котлы; T₁, T₂ — турбины

пылепитателей, забивание приемной трубы сырого угля молотковой мельницы и т. п.), приводящем к внезапному уменьшению подачи топлива, например B'_T . Вследствие этого произойдет перераспределение суммарной паровой нагрузки между котлами (уменьшение $D'_{п.п.}$ и увеличение $D''_{п.п.}$), т. е. перегрузка одних котлов за счет неполного использования мощности других. При этом восполнение недостающего топлива за счет действия АСР начнется не с момента уменьшения подачи B'_T , а с момента снижения p_M и начала работы главного регулятора, т. е. со значительным запаздыванием (см. рис. 11.4). Это приведет к существенному отклонению давления пара.

Схема задание — топливо. Схема рассматриваемого варианта для параллельно работающих паровых котлов изображена на рис. 11.8. Отличие приведенной схемы от изображенной на рис. 11.7 состоит в том, что к регуляторам топлива 1 и 2 вместо ЖОС по положению РО подводятся сигналы по фактическому расходу топлива B'_T и B''_T . Это позволяет значительно уменьшить запаздывание в подаче топлива при самопроизвольных изменениях его расхода и улучшить качество переходных процессов по давлению пара. Задания по расходу топлива регуляторам 1 и 2 в зависимости от давления пара в общем паропроводе устанавливаются главным регулятором 3, а доля участия отдельных агрегатов в суммарной паровой нагрузке устанавливается ручными задатчиками ЗРУ. Однако схема задание — топливо может быть применена лишь для котлов, работающих на газообразном и жидком топливе из-за отсутствия в настоящее время надежных

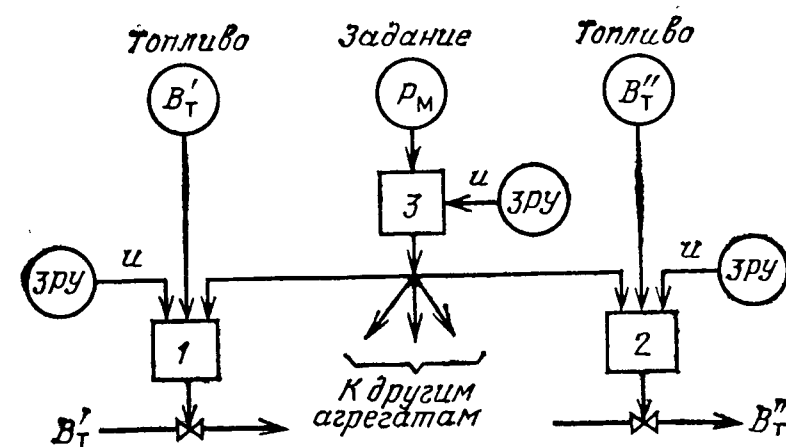


Рис. 11.8. Схема регулирования давления пара с главным регулятором и стабилизацией расхода топлива

и точных способов непрерывного измерения расхода пылевидного твердого топлива.

Кроме того, рассматриваемая схема будет с большим запаздыванием реагировать на изменения качества топлива.

Схема задание — теплота (тепловосприятие). Сравнение кривых переходного процесса парового котла по давлению перегретого пара (см. рис. 11.4, *б*) и тепловой нагрузке (см. рис. 11.4, *а*) при возмущении топливом показывает, что участок по теплоте обладает существенно меньшим запаздыванием ($\tau=25$ с против $\tau=1$ мин) и большей скоростью изменения давления $dp_6(t)/dt$, т. е. является менее инерционным. Тепловая нагрузка каждого котла может быть оценена по расходу пара и скорости изменения давления в барабане с помощью сигнала по теплоте, формируемого в соответствии с формулой (11.3) и рис. 11.3, а также с помощью сигнала по тепловосприятию (11.3) [см. формулы (11.7), (11.10) и рис. 11.5]. Малая инерционность и доступный способ измерения сигналов D_q и p_q позволяют их использовать в АСР стабилизации подачи топлива в соответствии со структурной схемой рис. 11.9, *а*. Функциональная схема регулирования подачи топлива для двух котлов, работающих на общий паропровод с применением сигнала по теплоте, изображена на рис. 11.9, *б*. Регулятор давления пара 1 выполняет функции автоматического задатчика по отношению к регуляторам топлива 2 и 3 и служит корректирующим регулятором. Доля участия каждого котла в общей паровой нагрузке, как и в предыдущих схемах, устанавливается ручными задатчиками ЗРУ.

В отличие от схемы с главным регулятором паровая нагрузка каждого из котлов в установившемся режиме стабилизируется регуляторами подачи топлива 2 и 3, выполняющими роль регуляторов тепловой нагрузки. При этом изменения общей паровой нагрузки со стороны турбины возмещаются соответствующим изменением задания

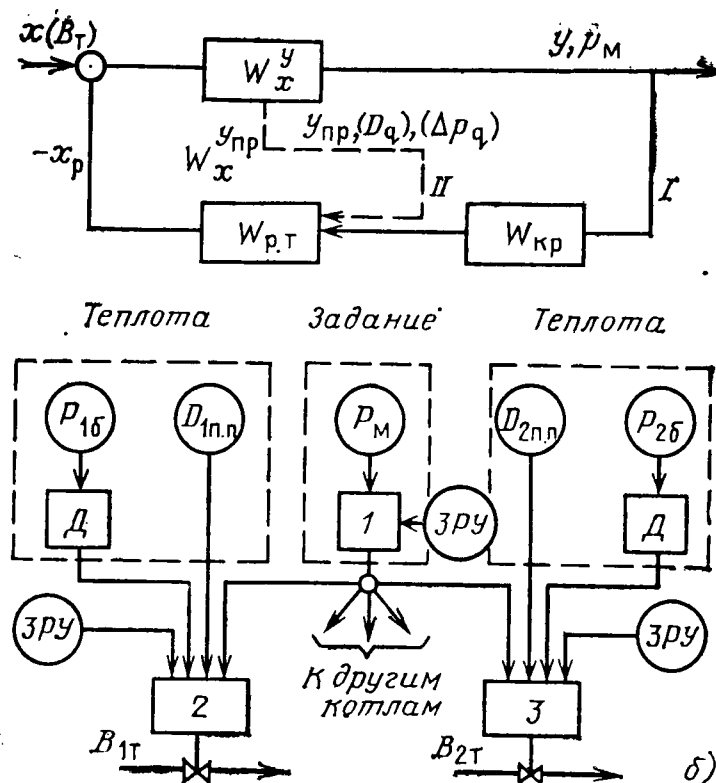


Рис. 11.9. Структурная схема АСР подачи топлива и регулирование подачи топлива по схеме задание — теплота:

а — структурная схема АСР подачи топлива; б — регулирование подачи топлива по схеме задание — теплота

за счет действия корректирующего регулятора давления 1, а топочные возмущения, приводящие к изменению тепловыделения в топке, устраняются действием регуляторов 2 и 3 с помощью сигналов D_g или Δp_q .

11.3. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

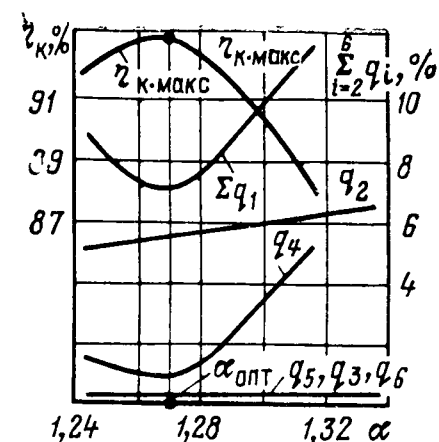
Характеристики участка регулирования. Экономичность работы парового котла оценивается по его КПД, равному отношению полезной теплоты, затраченной на генерирование и перегрев пара к затраченной теплоте, которая могла бы быть получена при сжигании всего топлива.

Без учета теплоты, вносимой в топку воздухом, и потерь на продувку

$$\eta_{пк} = \frac{D_{п.п}(h_0 - h_{п.в})}{B_T Q_p^p}, \quad (11.11)$$

где h_0 , $h_{п.в}$ — энтальпии перегретого пара и питательной воды; Q_p^p — низшая рабочая теплота сгорания топлива.

Рис. 11.10. Графики зависимости $\sum_{i=2}^6 q_i = f(\alpha)$, $\eta_{пк} = f(\alpha)$ для пылеугольного котла типа ТП-87, $D_{п.п} = 420$ т/ч



Задача регулирования экономичности состоит в поддержании максимального КПД парового котла или сведении к минимуму тепловых потерь, сопровождающих процесс сжигания топлива и передачи выделившейся теплоты воде и пару. Регулирование экономичности непосредственно по КПД или суммарной оценке потерь теплоты не получило пока широкого распространения из-за отсутствия надежных и точных способов и средств их непрерывного измерения.

Одним из наиболее представительных косвенных способов оценки экономичности процесса горения служит анализ состава топочных газов, покидающих топку. На основе зависимости КПД и суммарных потерь теплоты от избытка воздуха, определяемой индивидуально для каждого агрегата, стремятся поддерживать коэффициент избытка воздуха α , при котором КПД парового котла $\eta_{пк} \rightarrow \eta_{пк-макс}$ и суммарные потери

$$\sum_{i=2}^6 q_i \rightarrow \sum_{i=2}^6 q_i^{мин} [12].$$

Значение избытка воздуха можно оценить по содержанию свободного кислорода в газах, покидающих топочную камеру, по формуле

$$\alpha = 21/(21 - O_2). \quad (11.12)$$

Значение α в основном влияет на q (потери теплоты с уходящими газами), q_3 и q_4 (потери теплоты от химического и механического недожога топлива); качественные зависимости $\sum q_i = f(\alpha)$ и $\eta_{пк} = f(\alpha)$ представляются в виде графиков, изображенных на рис. 11.10 [16]. Участок регулирования экономичности процесса горения по содержанию кислорода в топочных газах конструктивно образуют топочная камера и примыкающий к ней газоход конвективного перегревателя до места измерения содержания O_2 .

Входным регулирующим воздействием участка служит расход воздуха, поступающего в топку $Q_{в}$, а выходной ре-

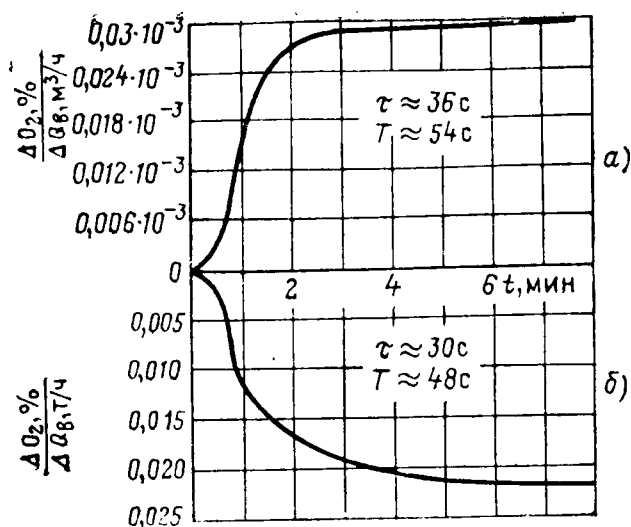


Рис. 11.11. Кривые разгона по O_2 при возмущении расходом: а — воздуха ΔQ_v , $m^3/ч$; б — топлива (газа) ΔB_t , $m^3/ч$

гулируемой величиной — содержание свободного кислорода в поворотной камере газохода за пароперегревателем (см. рис. 11.1).

Оптимальное значение O_2 в поворотной камере при номинальной нагрузке и сжигании пылевидного топлива находится в пределах 3—5 %; при сжигании газа и мазута — значительно ниже (от 0,5 до 1,5 %).

Кривые переходного процесса участка по содержанию кислорода O_2 в дымовых газах за пароперегревателем при нанесении возмущения в сторону увеличения расхода воздуха Q_v , и газового топлива B_t приведены на рис. 11.11. Инерционность участка определяется в основном запаздыванием в измерительном устройстве. При математическом описании динамических свойств этот участок можно представить в виде последовательного соединения двух звеньев: звена транспортного запаздывания τ и инерционного звена первого порядка с постоянной времени T .

Способы и схемы регулирования. Основным способом поддержания оптимального избытка воздуха за пароперегревателем служит изменение количества воздуха, подаваемого в топку дутьевыми вентиляторами. Существует несколько вариантов схем автоматического управления экономичностью процесса горения по соотношению различных сигналов.

1. **Регулирование экономичности по соотношению топлива — воздух.** Количество воздуха, необходимого для обеспечения требуемой полноты сгорания, и топлива при его постоянном качестве связаны между собой прямой пропорциональной зависимостью, устанавливаемой в результате режимных испытаний. Если измерение расхода топлива осуществляется достаточно точно, то поддержание оп-

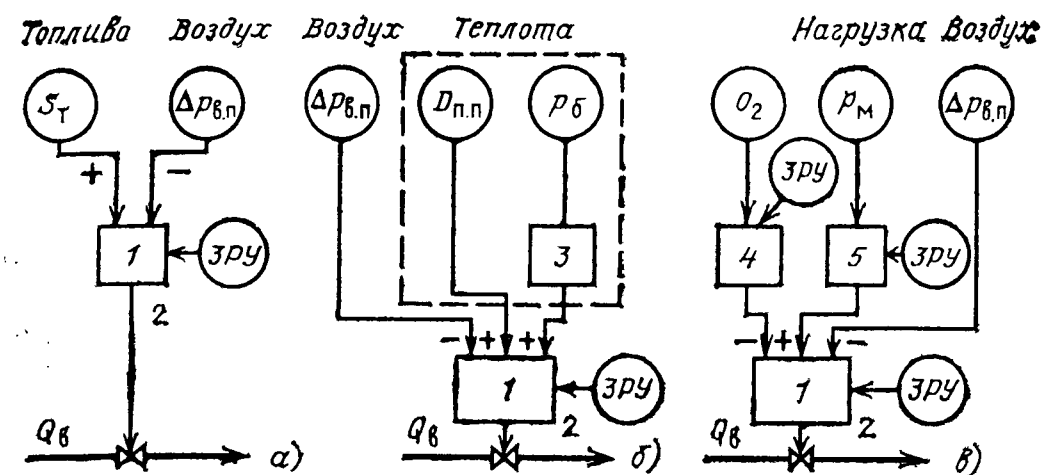


Рис. 11.12. Регулирование подачи воздуха по соотношению:

а — топливо — воздух; б — теплота — воздух; в — нагрузка — воздух с коррекцией по O_2 ; 1 — регулятор подачи воздуха; 2 — регулирующий орган; 3 — дифференциатор; 4 — корректирующий регулятор воздуха; 5 — корректирующий регулятор давления перегретого пара (регулятор задания по нагрузке)

тимального избытка воздуха можно осуществить по соотношению сигналов *расход топлива — расход воздуха*, используя схему регулирования подачи воздуха, известную под названием *топливо — воздух* (рис. 11.12, а). При газообразном топливе требуемое соотношение между количествами газа и воздуха осуществляется наиболее просто — сравнением перепада давлений на сужающем устройстве, устанавливаемом на газопроводе Δp_r , с перепадом давлений на воздухоподогревателе Δp_v или на специальном измерительном устройстве расхода воздуха — мультипликаторе [16]. Разность перепадов давлений $\Delta p_r - p_v$ служит входным сигналом автоматического регулятора экономичности, управляющего подачей дутьевых вентиляторов. Однако непрерывное и прямое измерение расхода пылевидного твердого топлива, как отмечалось выше, до сих пор является нерешенной проблемой. Поэтому применение схемы *топливо — воздух* оправдано лишь при наличии жидкого или газообразного топлива постоянного состава.

2. **Регулирование экономичности по соотношению теплота — воздух** (рис. 11.12, б). На единицу расхода различного по составу топлива необходимо различное количество воздуха, но его потребность на единицу теплоты, выделяющейся при сгорании, остается постоянной.

Если тепловыделение в топке, эквивалентное тепловой нагрузке котла, оценивать по расходу перегретого пара и скорости изменения давления пара в барабане, т. е. по теплоте, то инерционность этого суммарного сигнала (D_q

на рис. 11.4, в) при топочных возмущениях будет существенно меньше инерционности одного сигнала по расходу пара $D_{п.п.}$. Соответствующее заданному тепловыделению количество воздуха измеряется по перепаду давлений на воздухоподогревателе или по давлению воздуха в напорном патрубке вентилятора. Разность этих сигналов используется в качестве входного сигнала регулятора экономичности в схемах регулирования *теплота — воздух*.

3. *Регулирование экономичности по соотношению задание — воздух* с дополнительным сигналом по содержанию O_2 в дымовых газах (рис. 11.12, в). Процентное содержание O_2 в продуктах сгорания топлива характеризует избыток воздуха и слабо зависит от состава топлива. Поэтому использование O_2 в качестве входного сигнала автоматического регулятора, воздействующего на расход воздуха, представляется вполне целесообразным¹. Однако реализация этой схемы затруднена из-за отсутствия надежных и быстродействующих газоанализаторов на кислород. Поэтому в промышленных условиях получили распространение схемы регулирования подачи воздуха не с прямым, а с корректирующим воздействием по O_2 .

Поддержание избытка воздуха по соотношению *теплота — воздух* отличается простотой и надежностью, но не является точным. Этот недостаток устраняется в системе регулирования экономичности, действующей, например, по схеме *задание — воздух* с дополнительной коррекцией по O_2 , в которой регулятор подачи воздуха изменяет его расход по сигналу от главного или корректирующего регулятора давления 5. Сигнал, пропорциональный расходу воздуха Δp_v , как и в других схемах, во-первых, устраняет возмущения по расходу воздуха, не связанные с регулированием экономичности (включение или отключение систем пылеприготовления и т. п.), во-вторых, способствует стабилизации самого процесса регулирования подачи воздуха, так как служит одновременно сигналом жесткой отрицательной обратной связи. Введение дополнительного корректирующего сигнала по содержанию O_2 повышает точность поддержания оптимального избытка воздуха в любой системе регулирования экономичности. Добавочный корректирующий регулятор 4 по O_2 в схеме регулирования *задание — воздух* непосредственно управляет подачей воз-

духа при топочных возмущениях и обеспечивает поддержание заданного избытка воздуха в зависимости от нагрузки агрегата.

11.4. РЕГУЛИРОВАНИЕ РАЗРЕЖЕНИЯ В ТОПКЕ

Характеристики участка регулирования. Наличие небольшого (до 2—3 мм вод. ст.) постоянного разрежения S_T в верхней части топки необходимо по условиям нормального топочного режима. Оно препятствует выбиванию газов из топки, способствует устойчивости факела и служит косвенным показателем материального баланса между нагнетаемым в топку воздухом и уходящими газами. Участок регулирования по разрежению представляет собой топочную камеру с включенными последовательно с ней газоходами от поворотной камеры до всасывающих патрубков дымососов. Входным регулирующим воздействием этого участка служит расход дымовых газов, определяемый подачей дымососов. Возмущающими воздействиями служат изменения подачи воздуха в зависимости от тепловой нагрузки агрегата, а также нарушения газовойоздушного режима, связанные с работой систем пылеприготовления, операциями по удалению шлака и др.

Кривая разгона сигнала S_T при возмущении подачи топочных газов приведена на рис. 11.13, а. Рассматриваемый участок не имеет запаздывания, обладает малой инерционностью и значительным самовыравниванием. Особенность участка состоит в колебаниях регулируемой величины около среднего $S_{от}$ — с амплитудой до 30—50 Па (3—5 мм вод. ст.) и частотой до нескольких герц. Такие колебания (пульсации), зависящие от большого числа факторов, в частности от пульсаций расходов топлива и воздуха, за-

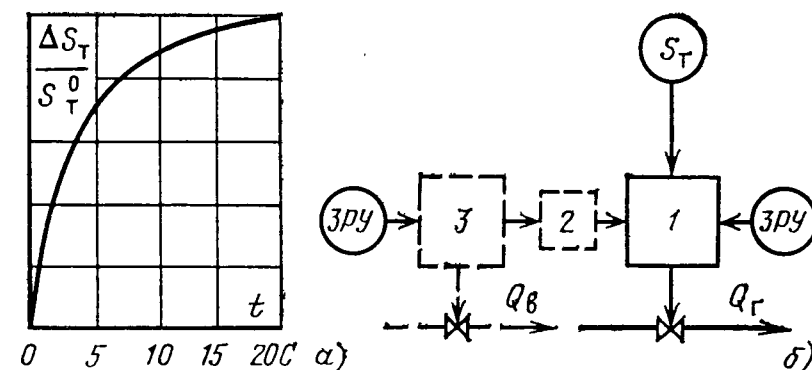


Рис. 11.13. АСР разрежения в топке:

а — переходный процесс по разрежению сверху топки при возмущении расходом газа $\Delta Q_г$; б — схема регулирования разрежения

¹ Предложен В. Д. Мироновым в 1956 г.

трудняют работу регулирующих приборов, в особенности снабженных релейными усилительными элементами, вызывая их слишком частые срабатывания. Для сглаживания пульсаций перед первичными измерительными приборами устанавливаются специальные демпфирующие устройства: дроссельные шайбы, импульсные трубы повышенного диаметра или баллоны (емкости). Для этого может быть использован также электрический демпфер — RC-цепочка, имеющийся в электрических схемах измерительных блоков регулирующих приборов.

Способы и схемы регулирования. Регулирование разрежения обычно осуществляется посредством изменения количества уходящих газов, отсасываемых дымососами. При этом их подача регулируется поворотными многоосными дроссельными заслонками, направляющими аппаратами, изменением частоты вращения рабочего колеса дымососа с первичным двигателем. Сравнительная оценка различных способов регулирования иллюстрируется графиками удельных расходов электрической энергии на тягу (см. рис. 10.10).

Наибольшее распространение получила схема регулирования разрежения с одноимпульсным ПИ-регулятором (рис. 11.13, б). Требуемое значение регулируемой величины устанавливается ручным задатчиком ЗРУ регулятора разрежения 1. Включение регулятора воздуха 2 приводит к временному нарушению материального баланса между поступающим воздухом и уходящими газами. При работе парового котла в регулирующем режиме могут происходить частые изменения тепловой нагрузки и, следовательно, изменения расхода воздуха. Для предупреждения частого возникновения такого небаланса и увеличения быстродействия регулятора разрежения рекомендуется ввести в ПИ-регулятор разрежения дополнительное исчезающее воздействие от регулятора воздуха через устройство динамической связи 3. Устройством динамической связи, например, может служить RC-цепочка (см. рис. 1.22). Ее выходной сигнал поступает на вход регулятора разрежения лишь в момент включения регулятора воздуха.

11.5. РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРВИЧНОГО ПЕРЕГРЕВА ПАРА

Характеристика участка и способы регулирования. Температура перегрева пара на выходе парового котла относится к важнейшим параметрам, определяющим надежность

и экономичность работы паровой турбины и энергоблока в целом. В соответствии с требованиями ПТЭ [26] допустимые отклонения температуры перегрева пара от номинального значения, например, для параметров пара $p_{п.п} = 9,8 \text{ МПа}$ (100 кгс/см^2) и $t_{п.п} = 540^\circ \text{C}$ составляют в сторону увеличения $+5^\circ \text{C}$, а в сторону уменьшения -10°C . Температура перегрева пара для барабанных котлов зависит от тепловосприятости пароперегревателя и паровой нагрузки. При постоянстве паровой нагрузки тепловосприятость перегревателей определяется топочным режимом и может изменяться в зависимости от загрязнения поверхностей нагрева, избытка воздуха, изменений состава топлива и т. п. Изменения паровой нагрузки приводят к перераспределению тепловосприятости между конвективной и радиационной частями перегревателя и изменениями температуры пара на выходе.

Для барабанных котлов наиболее распространен способ регулирования температуры пара на выходе перегревателя при помощи пароохладителей. Конструктивно участок регулирования перегрева образует часть поверхности нагрева пароперегревателя, включая обогреваемые и не обогреваемые трубы, от места ввода охлаждающего агента до выходного коллектора, в котором необходимо поддерживать заданную температуру $t_{п.п}$. Схема участка представлена на рис. 11.14. К возмущающим воздействиям от-

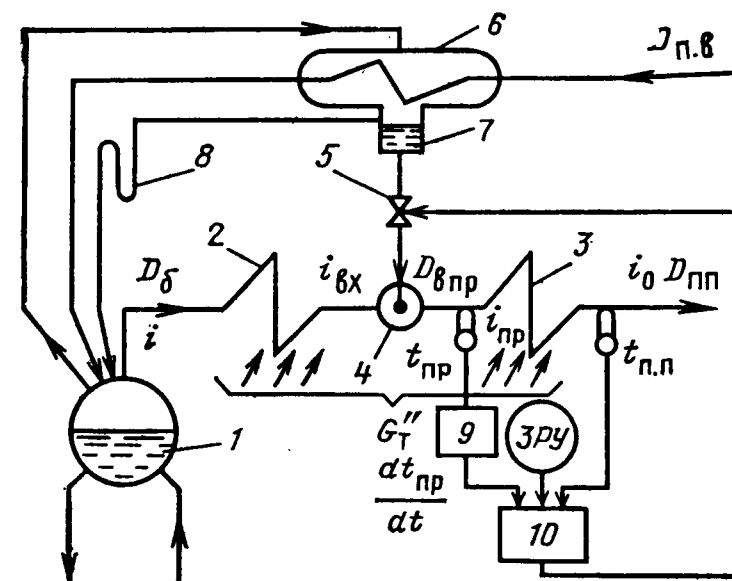


Рис. 11.14. Принципиальная схема регулирования температуры перегрева пара:

1 — барабан; 2, 3 — ступени пароперегревателя; 4 — пароохладитель; 5 — регулирующий клапан впрыска; 6 — охладитель пара; 7 — сборник конденсата; 8 — гидрозатвор; 9 — дифференциатор; 10 — регулятор

носятся энтальпия на входе в участок $h_{вх}$, расход потребляемого пара $D_{п.п}$ и количество теплоты, воспринимаемой от топочных газов, $Q''_т$. Выходной величиной участка служит энтальпия (температура) на выходе из пароперегревателя $h_{вых}$, регулирующим воздействием — расход охлаждающего агента $D_{впр}$.

Динамические характеристики пароперегревателя неодинаковы по каналам возмущающих и регулирующего воздействий, но обладают общим свойством — значительной инерционностью. Инерционность термпар учитывается при определении экспериментальных динамических характеристик пароперегревателей. Инерционность участка регулирования в целом в большой мере зависит от конструкции пароохладителя.

Современные энергетические барабанные паровые котлы оснащаются впрыскивающими пароохладителями. Принцип их действия основан на изменении энтальпии частично перегретого пара за счет теплоты, отбираемой на испарение охлаждающей воды, впрыскиваемой в паропровод. Конструкции впрыскивающих пароохладителей разнообразны. Одна из них изображена на рис. 11.15. Кривые изменения $t_{п.п} = f(t)$ по каналу $D_{впр} - t_{п.п}$ приведены на рис. 11.16. Преимущество впрыскивающего пароохладителя — снижение инерционности участка регулирования; недостаток — загрязнение пара охлаждающей водой. Устранение последнего достигается впрыском собственного конденсата из барабана. Для этого насыщенный пар барабана D_6 (см. рис. 11.14) поступает в охладитель пара — конденсатор 8 и из сборника конденсата 7 подается в пароохладитель 4.

Схемы автоматического регулирования. Общепринятой служит схема регулирования температуры перегрева с исчезающим сигналом из промежуточной точки (см. рис. 11.14). Регулятор перегрева 10 получает основной сигнал по отклонению температуры пара на выходе пароперегревателя $t_{п.п}$ и дополнительный — пропорциональный скорости температуры пара в промежуточной точке непосредственно за пароохладителем $dt_{пр}/dt^*$, упреждающий изменения температуры на выходе при изменениях энтальпии частично перегретого пара $h_{вх}$ и исчезающий при $t_{пр} \rightarrow t_{уст.пр}$. Приближение места впрыска к выходу пароперегревателя уменьшает инерционность участка и, следовательно, улучшает качество процессов регулирования. Вместе с тем это приводит к ухудшению температурного режима металла

* В действительности используется реальное дифференцирующее звено.

Рис. 11.15. Впрыскивающий пароохладитель

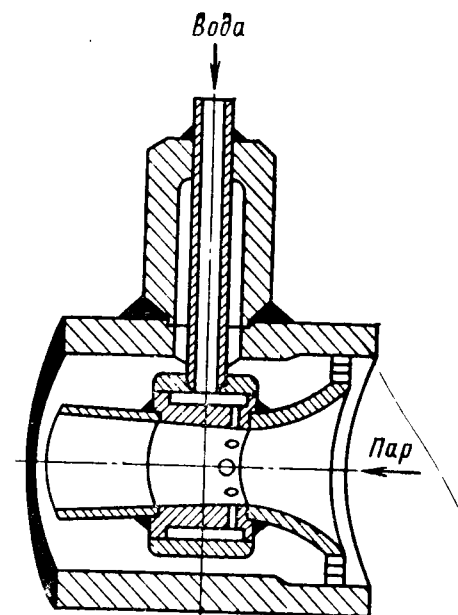
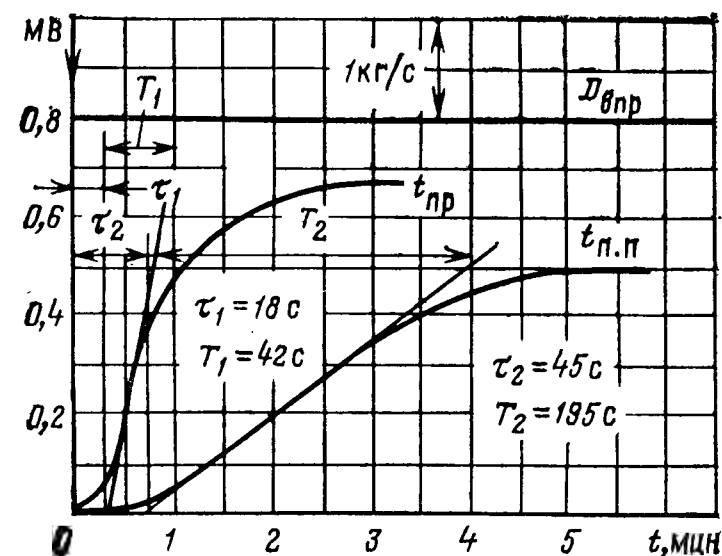


Рис. 11.16. Временные характеристики по температуре первичного пара



поверхностей нагрева, расположенных до пароохладителя. Поэтому на мощных энергетических котлах с развитым пароперегревателем применяется многоступенчатое регулирование, в котором по ходу пара устанавливаются два и более впрыскивающих устройств, управляемых автоматическими регуляторами температуры. Это позволяет более точно регулировать температуру пара на выходе и одновременно защитить металл предвключенных ступеней перегревателя. Автоматический регулятор каждого впрыска также действует по двухимпульсной схеме: с основным сигналом по отклонению температуры на выходе «своей» ступени и дополнительным исчезающим (скоростным) сигналом по температуре пара после пароохладителя. При наличии не-

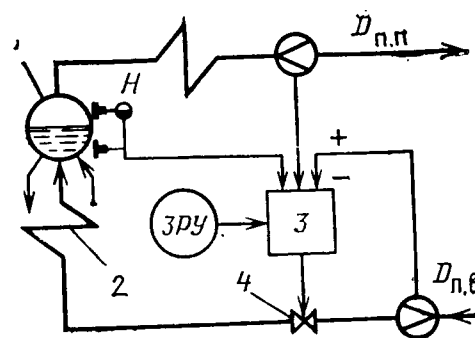


Рис. 11.18. Трехимпульсная АСР питания водой барабанного котла:
1 — барабан; 2 — экономайзер; 3 — регулятор питания; 4 — регулирующий клапан питательной воды

ного контура и росту уровня. Описанное явление носит название *набухания* или *вспучивания*.

Схема автоматического регулирования. Автоматический регулятор должен обеспечить постоянство среднего значения уровня независимо от нагрузки парового котла и других возмущающих воздействий. В переходных режимах изменение уровня протекает довольно быстро [см. (11.15)], поэтому регулятор питания должен поддерживать постоянство соотношения расходов питательной воды и пара. Эту задачу выполняет трехимпульсный регулятор питания (рис. 11.18). Регулятор 3 перемещает клапан 4 при появлении сигнала небаланса между расходами питательной воды $D_{п.в}$ и пара $D_{п.п}$. Помимо того, он воздействует на положение питательного клапана при отклонениях уровня от заданного значения H_6 . Данная схема имеет широкое применение на крупных энергетических барабанных паровых котлах.

11.7. РЕГУЛИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

Характеристика участка регулирования. Химический состав воды, циркулирующей в барабанных паровых котлах, оказывает существенное влияние на длительность их безостановочной или безремонтной кампаний. К основным показателям качества котловой воды относятся общее содержание в пересчете на концентрацию NaCl , мг/кг, и избыток концентрации фосфатов (содержание ионов PO_4^{3-} , мг/кг) [17]. Повышение общего солесодержания приводит к уносу солей котловой воды в пароперегреватель и турбину. Недостача фосфатов вызывает интенсивный процесс накипеобразования на внутренних поверхностях экранов труб, что приводит к ухудшению их охлаждения паровой смесью; перегреву в местах образования накипи и в конечном итоге к пережогу.

Поддержание общего солесодержания котловой воды в

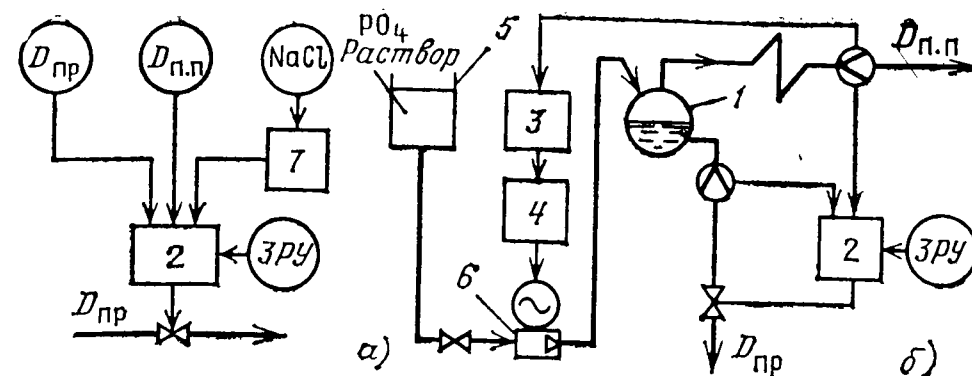


Рис. 11.19. Регулирование водного режима барабанного парового котла:

а — схема регулирования продувки с трехимпульсным регулятором; б — принципиальные схемы регулирования продувки и ввода фосфатов; 1 — барабан; 2 — регулятор продувки; 3 — импульсатор расхода пара; 4 — пусковое устройство; 5 — мерный бак; 6 — плунжерный насос; 7 — корректирующий прибор

пределах нормы осуществляется непрерывной и периодической продувками из барабана в специальные расширители. Потери котловой воды с продувкой восполняются питательной водой в количестве, определяемом уровнем воды в барабане. Периодическая продувка служит для удаления скоплений шлама в нижних коллекторах, производится 1—2 раза в смену и, как правило, не автоматизируется.

Непрерывная продувка служит для удаления избытка солей NaCl и SiO_2 , скапливающихся в котловой воде в процессе парообразования. Расход воды непрерывной продувки колеблется в пределах 0,5—2 % максимальной производительности парового котла.

По своим динамическим свойствам этот участок регулирования типичен для тепловых инерционных объектов. Время запаздывания τ при нанесении возмущения расходом пара или количеством продуваемой воды определяется в основном инерционностью измерительных устройств и составляет 1—3 мин; постоянная времени $T=10+40$ мин в зависимости от типа парового котла.

Схема автоматического регулирования. На паровых котлах электростанций предусматривается автоматическое регулирование непрерывной продувки путем воздействия регулятора на регулирующий клапан на линии непрерывной продувки. Обычно применяется двух- или трехимпульсная схема регулирования (рис. 11.19).

В первой схеме (рис. 11.19, а), помимо корректирующего сигнала по солесодержанию, на вход ПИ-регулятора 2 поступает сигнал по расходу продувочной воды $D_{пр}$ и сигнал по расходу пара $D_{п.п}$. В некоторых случаях непрерывная продувка определяется не общим солесодержанием котло-

вой воды, а концентрацией кремниевой кислоты. При этом поддержание концентрации кремниевой кислоты в допустимых пределах гарантирует поддержание в пределах нормы и общего солесодержания котловой воды. Однако прямое и непрерывное измерение концентрации кремниевой кислоты в настоящее время еще не освоено. Содержание солей SiO_2 в котловой воде оценивается по косвенным показателям: паровой нагрузке и количеству продуваемой воды. При этом зависимость между содержанием кремниевой кислоты, паровой нагрузкой и непрерывной продувкой устанавливается по результатам специальных теплотехнических испытаний. Автоматическое регулирование продувки в этом случае осуществляется по двухимпульсной схеме (рис. 11.19, б).

Для выполнения условий безнакипной работы поверхностей нагрева и поддержания требуемой щелочности котловой воды барабанный котел оснащается аппаратурой, регулирующей ввод фосфатов. Концентрация фосфатов PO^{3-4} должна поддерживаться в пределах 10—20 мг/кг с точностью до $\pm (3-5)$ мг/кг при бесступенчатом испарении, а при ступенчатом испарении в пределах 5—10 мг/кг в чистом отсеке и до 75 мг/кг в соленом отсеке [26]. Требуемая концентрация PO^{3-4} устанавливается в зависимости от паровой нагрузки $D_{\text{п.п}}$ путем ввода фосфатов в чистый отсек барабана в соответствии с принципиальной схемой (рис. 11.19, б).

Мерный бак 5 заполняется раствором фосфата натрия крепостью 5 г/кг. Сигнал по расходу пара поступает на расходомер 8, электро-механический интегратор которого используется в качестве импульсатора, воздействующего через пусковое устройство 4 на включение и отключение плунжерного фосфатного насоса 6. При увеличении паровой нагрузки возрастает продолжительность цикла включения фосфатного насоса и наоборот. Обычно такая система ввода фосфатов применяется совместно с двухимпульсной системой непрерывной продувки, изображенной на этой же схеме. Поэтому вводимые в барабан фосфаты находятся в постоянной зависимости от паровой нагрузки, а их содержание в котловой воде определяется непрерывной продувкой и концентрацией подаваемого раствора фосфата натрия, которая должна быть неизменной. Требуемые соотношения между количеством фосфатов, паровой нагрузкой и непрерывной продувкой устанавливаются по результатам теплотехнических испытаний.

Автоматизация непрерывной продувки и ввода фосфатов облегчает труд обходчиков оборудования, позволяет сократить трудоемкий лабораторный анализ качества кот-

ловой воды, ведет к увеличению срока безремонтной службы основного оборудования.

11.8. ПРЯМОТОЧНЫЙ ПАРОВОЙ КОТЕЛ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Принципиальная технологическая схема циркуляционного контура прямоточного парового котла изображена на рис. 11.20. Последовательно соединенные поверхности нагрева прямоточного парового котла можно представить в виде змеевика, в один конец которого поступает питательная вода, а из другого выходит перегретый пар. Этот змеевик укрупненно может быть разделен на три части: водяную, водопаровую и паровую. Положение точки начала перегрева пара, которая определяет границу между испарительной и перегревательной частями, изменяется в зависимости от паропроизводительности, количества подводимой теплоты и расхода питательной воды.

В прямоточном паровом котле в отличие от барабанного расход питательной воды оказывает непосредственное воздействие на расход, температуру и давление пара на выходе. Это оказывает существенное влияние на выбор способов и схем регулирования парового котла. АСР питания прямоточного котла в противоположность барабанному нельзя считать автономной. Она связана с АСР давления и температуры пара по тракту (до первого регулируемого впрыска). Существенно усложняется и регулирование температуры перегрева первичного пара из-за влияния на нее расхода питательной воды и более существенного, чем у барабанных, влияния подачи топлива. Это приводит к необходимости увеличения числа впрысков и расхода воды на впрыск. Доля впрысков у прямоточных котлов достигает до 10 % общего количества выработанного пара и оказывает заметное влияние на расход и параметры перегретого пара.

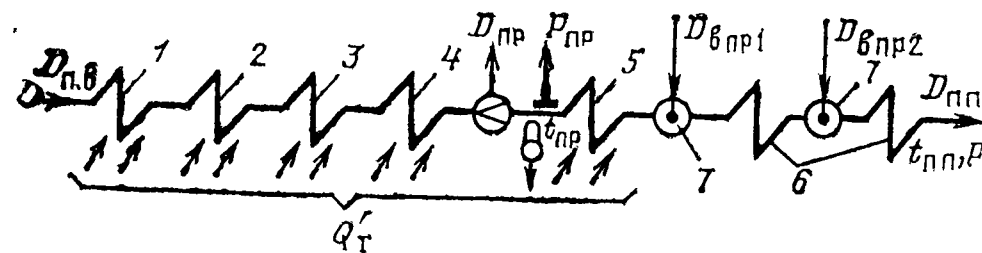


Рис. 11.20. Принципиальные схемы пароводяного тракта прямоточного котла:

1 — экономайзер; 2 — испарительная часть; 3 — переходная зона; 4 — средняя радиационная часть; 5, 6 — ступени пароперегревателя; 7 — парохладитель

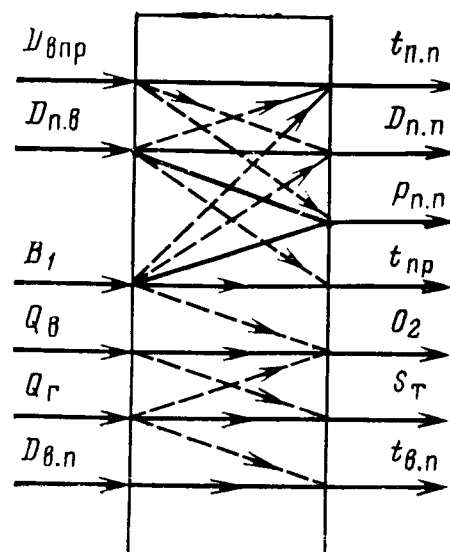


Рис. 11.21. Структурная схема связей вход — выход прямоточного котла

Упрощенная схема связей между входными и выходными величинами прямоточного котла представлена на рис. 11.21. В прямоточных котлах регулируются: процесс горения, тепловая нагрузка и перегрев пара, а также температурный режим водопарового (первичного) тракта от его начала до первого регулируемого впрыска.

11.9. РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ, ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПЕРВИЧНОГО ТРАКТА И ЭКОНОМИЧНОСТИ ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛА

Характеристика участка регулирования. Регулирование тепловой нагрузки, характеризуемой давлением и расходом пара, требует совместного и согласованного изменения расходов B_T и $D_{п.в.}$

Поэтому АСР подачи топлива и питательной воды для прямоточных котлов следует анализировать, проектировать и наладивать совместно.

Температурный режим первичного тракта, характеризуемый температурой пара в промежуточной точке тракта до первого впрыска $t_{пр}$, зависит от соотношения расходов воды и топлива. Влиять на $t_{пр}$ можно посредством любого из этих регулирующих воздействий. Кривые разгона по температуре на выходе участка при возмущении топливом и водой приведены на рис. 11.22.

В качестве входного для системы регулирования температурного режима первичного тракта используется соотношение сигналов вода ($G_{п.в.}$) — теплота (D_q) или же сигнал по температуре рабочей среды непосредственно в промежуточной точке водопарового тракта $t_{пр}$. В качестве основного сигнала, характеризующего фактическую тепловую нагрузку котла, применяются: расход питательной воды $G_{п.в.}$, сигнал по теплоте D_q и расход топлива B_T (на газомазутных установках). О нагрузке котла, работающего в моноблоке с турбиной, можно судить также по следующим косвенным сигналам: мощности турбогенератора N_g , давлению в камере регулирующей ступени турбины p_p , положению регули-

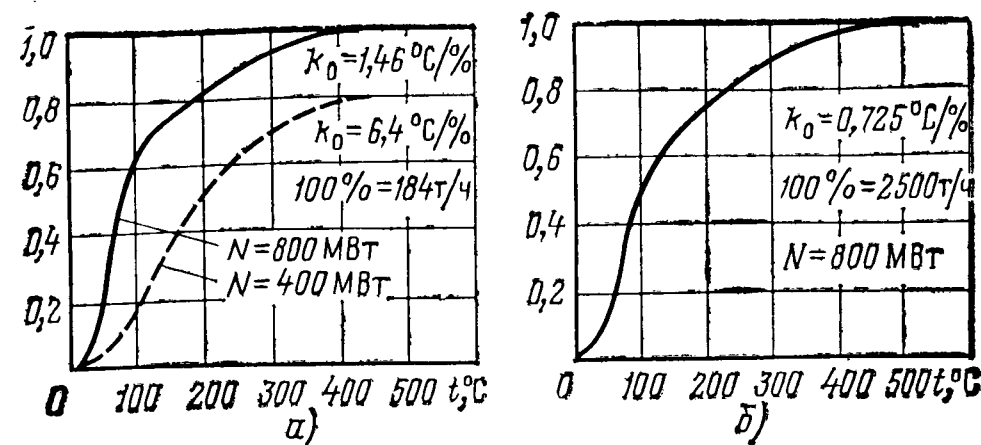


Рис. 11.22. Кривые разгона по $t_{пр}$ (за потолочным пароперегревателем) для котла типа ТГМП-204 при возмущениях топливом (а) и водой (б)

рующих клапанов турбины $h_{кл}$ (если давление пара перед турбиной поддерживается постоянным) и др.

В зависимости от функций, выполняемых регуляторами питания и топлива, существуют два вида схем. В первой регулятор питания служит регулятором тепловой нагрузки, а регулятор топлива поддерживает температурный режим первичного тракта, во второй — регуляторы меняются ролями.

Регулирование температурного режима по соотношению вода — теплота. Сигнал по теплоте в промежуточной точке водопарового тракта образуют суммированием трех сигналов:

1) «видимый» расход пара $D_{пр}^{вид}$ в промежуточном сечении тракта до первого впрыска (см. рис. 11.20). Отличие «видимого» расхода от действительного $D_{пр}^д$ связано с отклонениями плотности пара $\rho_{пр}$ в месте установки сужающего устройства от принятого расчетного значения:

$$D_{пр}^{вид} = D_{пр}^д \sqrt{\rho_{пр}^0 / \rho_{пр}}, \quad (11.16)$$

где $\rho_{пр}$ — действительная плотность пара в промежуточной точке; $\rho_{пр}^0$ — плотность, при которой выполнен расчет сужающего устройства;

2) скорость изменения давления в том же месте (для компенсации отклонения расхода пара, связанного с изменением аккумулированной теплоты при внешних возмущениях нагрузкой);

3) давление пара $p_{пр}$ в месте установки сужающего устройства (для компенсации влияния отклонения этого

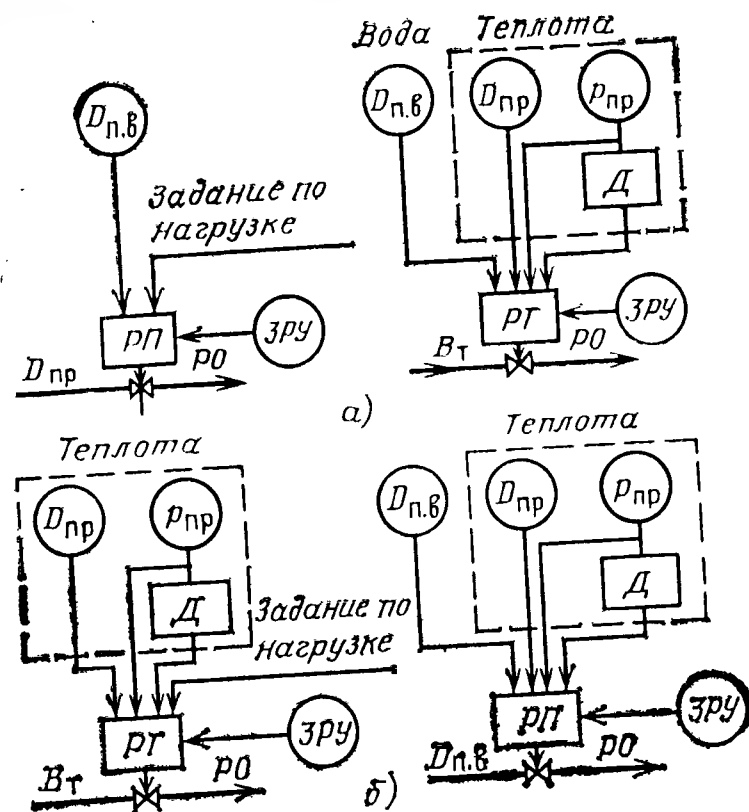


Рис. 11.23. Схемы регулирования тепловой нагрузки и температурного режима по соотношению вода — теплота:
 а — первый вариант (I); б — второй вариант (II); Д — дифференциатор; РП — регулятор питания; РТ — регулятор топлива

давления от расчетного значения на «видимый» расход). Видимый расход пара зависит не только от действительного расхода, но и от параметров пара (11.16), вследствие чего соотношение расхода воды $D_{п.в}$ и промежуточной теплоты D_q можно использовать в системах регулирования температурного режима первичного тракта. Временные характеристики проточного котла по промежуточной теплоте $D_{qпр} = f(t)$ имеют монотонный характер при возмущении топливом и слабо реагируют на изменения расхода питательной воды.

Способы и схемы регулирования. На рис. 11.23 представлены два основных варианта схем регулирования питания и топлива с контролем температурного режима первичного тракта по соотношению *расход воды — промежуточная теплота* [13, 18]. В первом варианте (I) регулятор питания, действующий по сигналам задание—вода, поддерживает нагрузку котла в соответствии с заданием, а регулятор топлива, действующий по соотношению вода — промежуточное тепло, ста-

билизирует температурный режим первичного тракта; во втором (II) — регуляторы меняются местами: тепловую нагрузку поддерживает регулятор топлива, а температурный режим — регулятор питания.

Сопоставим приведенные варианты схем регулирования питания и топлива.

1) В первом варианте контур регулирования топлива не оказывает влияния на контур регулирования питания. Во втором — между ними существует некоторая связь, так как промежуточная теплота реагирует не только на топливо $B_т$, но и на питательную воду $D_{п.в}$.

2) Для поддержания необходимого температурного режима первичного тракта требуется, чтобы существовал достаточный диапазон регулирования топлива в первом варианте и питания — во втором.

3) Динамическая точность поддержания температуры в промежуточной точке тракта ($t_{пр}$) при возмущениях нагрузкой в первом варианте выше, чем во втором; при топочных возмущениях — наоборот.

4) В отношении аппаратуры второй вариант несколько сложнее первого, так как требует дополнительных приборов для формирования сигнала по теплоте для двух регуляторов. Сложнее он и в настройке.

Определяющим фактором при выборе одного из вариантов служат длительные испытания в условиях эксплуатации и сравнительный анализ переходных процессов с привлечением интегральных показателей качества.

Общим и основным недостатком схем регулирования температурного режима первичного тракта по соотношению *теплота — вода* служат необходимость их тщательной статической настройки (совмещения статических характеристик сигналов по теплоте и расходу воды) и ограниченная статическая точность из-за погрешностей датчиков и приборов расхода. В связи с этим перспективным будет техническое решение с использованием сигнала по перепаду давления на обогреваемом участке циркуляционного контура котла*.

Регулирование температурного режима с непосредственным контролем температуры рабочей среды. В схемах с непосредственным контролем температуры рабочей среды статическая погрешность (остаточное отклонение) в поддержании заданного значения регулируемой величины существен-

* Предложен ВТИ в 1984 г.

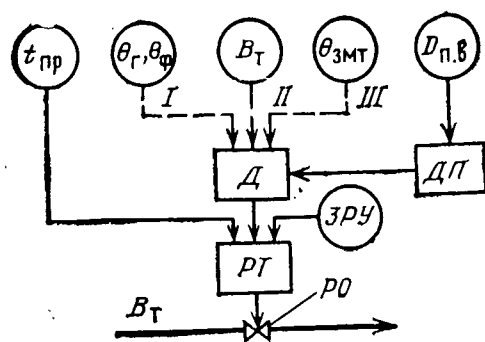


Рис. 11.24. Схема регулирования температурного режима с непосредственным контролем температуры пара в промежуточной точке тракта:
I—III — варианты схем регулирования

но меньше (в 1,5—3 раза), чем в схемах, действующих по соотношению *вода — теплота*. Это объясняется значительно меньшей допустимой погрешностью датчиков температуры по сравнению с датчиками расхода [16].

В большинстве случаев в схемах регулирования с непосредственным контролем температуры поддержание нагрузки парового котла возлагается на регулятор питания, действующий по схеме *задание — вода* (рис. 11.23, а), а поддержание температурного режима — на регулятор топлива. Температура пара на выходе первичного тракта (перед первым впрыском) обладает существенной инерцией по отношению к возмущениям топливом и водой. Поэтому для поддержания ее отклонений в допустимых пределах на вход регулятора топлива вводятся опережающие сигналы, по виду которых в основном и различаются варианты схем регулирования. Рассмотрим некоторые варианты схем.

Вариант I (рис. 11.24, вариант I). Основным сигналом служит температура пара в промежуточной точке тракта $t_{пр}$. В качестве опережающих сигналов, поступающих на вход регулятора топлива через дифференциатор D , используются сигналы по температуре дымовых газов (внутренний опережающий сигнал) θ_g и по расходу питательной воды (внешний опережающий сигнал). Для более точной и независимой настройки внешнего сигнала в схеме предусматривается динамический преобразователь $ДП$ с изменяемыми коэффициентами настройки.

Достоинства рассматриваемого варианта АСР: быстрая реакция на топочные возмущения ($\tau = 8 \div 10$ с), независимость настройки внешнего опережающего сигнала, относительная простота настройки самого регулятора топлива и дифференциатора с использованием методики расчета настроек, разработанных для двухконтурных схем регулирования температуры перегрева пара с исчезающим сигналом из промежуточной точки (см. § 5.5). Его недостаток — быстрый износ (до полугода непрерывной работы) газовых

термоприемников, контактирующих с агрессивной средой, и пульсация сигнала по θ_g . В настоящее время взамен сигнала по θ_g успешно применяется менее инерционный сигнал по изучению факела θ_f , формируемый с помощью параллельно включенных радиационных пирометров, устанавливаемых в верхней части топки и визируемых на факел [16, 18]. Вариант I опробован и внедрен на пылеугольных паровых котлах различной мощности.

Вариант II. Отличается от первого только тем, что вместо сигнала по θ_g используется расход топлива (рис. 11.24, вариант II). Схема опробована и внедрена на паровых котлах, работающих на газомазутных топливах, расход которых можно измерить непосредственно.

Вариант III (рис. 11.24, вариант III). Отличается от первого и второго применением опережающего сигнала по температуре воды перед зоной максимальной теплоемкости (ЗМТ) $\theta_{ЗМТ}$. Этот сигнал, являясь более инерционным по сравнению с θ_g и θ_f , все-таки сравнительно быстро реагирует на возмущения топливом ($\tau = 15$ с) и водой ($\tau = 40$ с), а температуру воды значительно проще и надежнее измерить, чем температуру топочных газов или излучение факела.

К недостаткам схемы следует отнести зависимость динамики участка по каналу $B_t - \theta_{ЗМТ}$ от режимных факторов, влияющих на положение ЗМТ, и как следствие этого — ухудшение качества процессов регулирования при резкопеременных режимах, вызываемых возмущениями нагрузкой и температурой питательной воды. Схема опробована и внедрена на ряде мощных паровых котлов.

Для всех трех вариантов схем отсутствует взаимосвязь между контурами питания и топлива; характер переходных процессов, вызванных топочными возмущениями, остается таким же, как и в варианте I схемы воды — теплота (см. рис. 11.23, вариант I). При возмущениях нагрузкой во всех трех случаях можно обеспечить динамическое соответствие расходов воды $D_{п.в.}$ и топлива B_t , необходимое для обеспечения допустимых отклонений температуры $t_{пр}$.

Выбор того или иного варианта схемы регулирования подачи топлива с непосредственным контролем температуры пара определяется типом прямоточного котла, его параметрами и видом сжигаемого топлива. Исключение составляет лишь вариант II для газомазутных котлов, в котором регулятор топлива и питания можно поменять местами (рис. 11.25). Это не приведет к усложнению схемы в целом. Выбор более целесообразной из них должен основываться

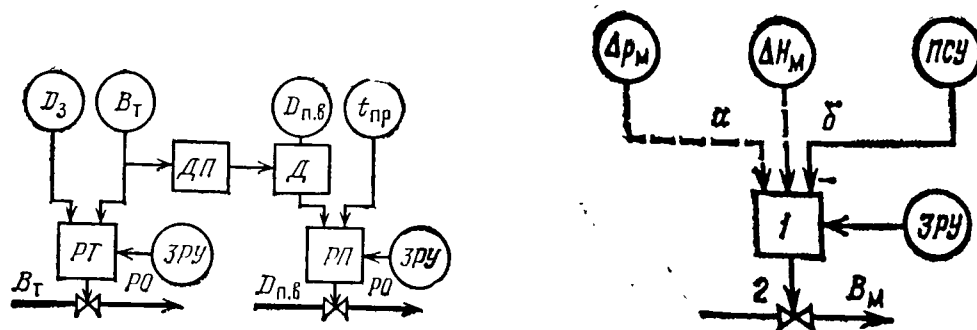


Рис. 11.25. Схема регулирования температурного режима для котлов, работающих на газомазутном топливе (обозначения те же, что и на рис. 11.23)

Рис. 11.26. Регулирование подачи воздуха прямооточного котла по схеме вода — воздух с коррекцией по O_2 :

1 — регулятор экономичности; 2 — регулирующий орган подачи воздуха; 3 — корректирующий регулятор по содержанию O_2 за конвективным пароперегревателем

на оценке качества переходных процессов и сравнении результатов испытаний при включенной АСР подачи воздуха.

Регулирование экономичности процесса горения. Схемы регулирования экономичности процесса горения для прямооточных паровых котлов строятся в зависимости от выбранных вариантов схем регулирования тепловой нагрузки. В частности, используются схемы: нагрузка — воздух (см. рис. 11.12, б) при регулировании подачи топлива по схеме нагрузка — теплота; вода — воздух (рис. 11.26) при регулировании подачи топлива по схеме вода — теплота; топливо — воздух (см. рис. 11.12, а) при работе котла на газомазутном топливе.

Введение корректирующего сигнала по содержанию свободного кислорода O_2 во всех схемах обеспечивает более точное поддержание коэффициента избытка воздуха.

Разрежение вверху топки регулируется так же, как и в барабанных котлах (см. рис. 11.13, б).

11.10. РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРВИЧНОГО ПЕРЕГРЕВА ПАРА ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛА

Характеристика участков регулирования. Пароперегревательная часть прямооточных паровых котлов состоит из отдельных последовательно включенных участков, разграниченных конструктивно и размещенных в различных температурных зонах газового тракта. Поверхности нагрева отдельных участков, соединительные трубопроводы и паросборные коллекторы, а также устройства впрыска охлажда-

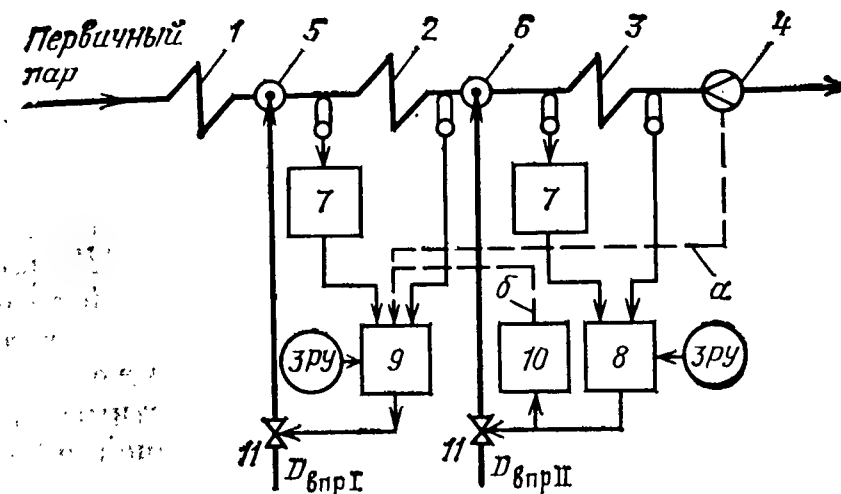


Рис. 11.27. Регулирование температуры первичного пара:

1—3 — ступени пароперегревателя; 4 — сужающее устройство; 5, 6 — парохладитель; 7 — дифференциатор; 8 — регулятор температуры перегрева первичного пара на выходе котла; 9 — предвключенный регулятор температуры перегрева пара; 10 — вспомогательный корректирующий регулятор; 11 — регулирующий клапан

дающей воды образуют объект управления. Экспериментальные кривые пароперегревателей прямооточных котлов по каналу впрыск — температура на выходе участка по своей форме аналогичны кривым, приведенным на рис. 11.16.

Способы и схемы регулирования. Температура на выходе каждого участка стабилизируется отдельными автоматическими регуляторами, действующими на впрыскивающие устройства, устанавливаемые между поверхностями нагрева.

Регулирование температуры перегрева пара последовательно включенных перегревательных участков осуществляется с помощью впрысков по двухимпульсной схеме.

На рис. 11.27 изображена принципиальная схема автоматической системы регулирования температуры первичного перегрева пара одного из контуров прямооточного парового котла с двумя впрысками. Введение дополнительного входного сигнала по заданию (расходу пара — вариант а) для регулятора 9 — первого по ходу пара впрыска — позволяет поддерживать температуру пара на выходе промежуточной ступени пароперегревателя в соответствии с тепловой нагрузкой агрегата. Переменный сигнал по заданию может быть сформирован и по положению регулирующего органа регулятора — второго по ходу пара впрыска (вариант б). В этом случае сигнал от датчика положения исполнительного механизма поступает на вход вспомогательного корректирующего регулятора, а с его выхода — на вход регулятора первого впрыска 9.

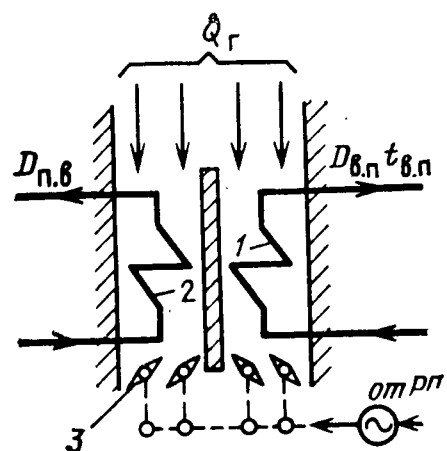


Рис. 11.30. Газовое регулирование температуры вторичного пароперегревателя перераспределением потока газов: 1 — вторичный пароперегреватель; 2 — экономайзер; 3 — поворотные заслонки

Конструктивно вторичный — «холодный пакет» 1 размещается в зоне сравнительно низких температур газов, а «горячий пакет» 2 выносится в зону высоких температур газов. Тепловосприятие пароперегревателя регулируется трехходовым клапаном 3, перепускающим часть «холодного» пара, помимо первого пакета, на вход второго. При таком способе регулирования температура вторичного пара практически не зависит от температуры первичного. В то же время диапазон регулирования может быть достаточно широким. ПИ-регулятор температуры 4 действует от двух сигналов — по отклонению температуры на выходе из вторичного пароперегревателя (основного) и дополнительного (исчезающего), сформированного с помощью дифференциатора 5 и датчика 6, установленного после смешения холодного и частично перегретого пара.

На случай чрезмерного повышения $t_{в.п}$ предусматривается дополнительный впрыск 7, управляемый автоматическим регулятором 8. Заданное значение $t_{в.п}$ основного регулятора 4 устанавливается меньшим, чем у регулятора 8, с тем, чтобы клапан аварийного впрыска 9 в нормальном режиме работы был закрыт. Кроме того, наличие блокировки в электрической схеме управления предусматривает возможность открытия аварийного клапана 9 лишь после полного открытия трехходового клапана 3.

4. Газовое регулирование. Эффективное воздействие на температуру вторичного перегрева пара может быть достигнуто за счет изменения количества теплоты, передаваемой поверхностям нагрева топочными газами. Для того чтобы общий расход топочных газов оставался неизменным, целесообразно воспользоваться перераспределением потока газов между газоходами конвективного перегревателя и водяного экономайзера. Принципиальная схема газового регулирования изображена на рис. 11.30. Регулирующие органы — поворотные

заслонки, с помощью которых осуществляется перераспределение газового потока, должны быть выполнены из жаропрочного материала и оборудованы специальной системой воздушного охлаждения. На вход автоматических регуляторов вторичного перегрева при газовом регулировании подаются два сигнала: первый (основной) по $t_{в.п.}$, второй упреждающий (исчезающий) по температуре газов перед вторичным перегревателем.

Контрольные вопросы

1. Назовите участки регулирования барабанного парового котла.
2. Как формируется сигнал по теплоте в барабанном котле?
3. Как формируется сигнал по тепловосприятию?
4. Сравните схемы регулирования подачи топлива задание — теплота и задание — топливо.
5. Для чего служит устройство динамической связи между регуляторами воздуха и разрежения?
6. Поясните принцип действия АСР питания котла водой на рис. 11.18.
7. Поясните типовую схему регулирования температуры перегрева пара, пользуясь рис. 11.14.
8. В чем основное отличие прямоточного котла от барабанного как объекта управления?
9. Как формируется сигнал по теплоте в прямоточном котле?
10. Поясните принцип действия АСР подачи топлива по температуре в промежуточной точке тракта.
11. Как регулируется экономичность процесса горения прямоточных котлов?
12. Поясните способы и схемы регулирования температуры вторичного перегрева пара.

Глава двенадцатая

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

12.1. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТОПЛИВОПОДАЧЕЙ

Подача твердого топлива к паровым котлам осуществляется по цепочке: щелевые приемные бункера, установленные в разгрузочных помещениях; лопастные питатели, расположенные под ними; промежуточные транспортеры пер-

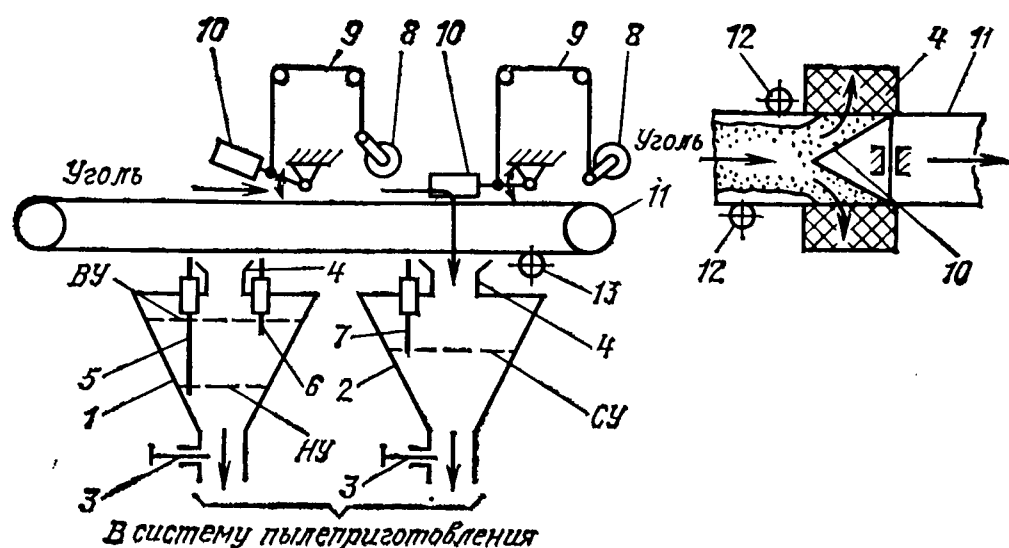


Рис. 12.1. Схема регулирования загрузки бункера углем

вой очереди; дробильные устройства; транспортеры второй очереди и бункера сырого угля, снабжающие системы пылеприготовления отдельных котлов.

В системе топливоподачи автоматизируются следующие периодические операции: 1) пуск механизмов и ленточных транспортеров; 2) процесс загрузки бункеров сырого угля и отклонение механизмов и транспортеров по окончании загрузки; 3) включение вибраторов при застревании угля в узлах пересыпки; 4) останов всех предыдущих по ходу топлива транспортеров при пробуксовке, обрыве и сходе ленты или забивании приемных устройств на последующих транспортерах.

Автоматический пуск механизмов и транспортеров. Сигнал на включение ленточных транспортеров поступает от датчиков нижних уровней, формирующих электрический сигнал при понижении уровня угля в каком-либо бункере ниже заданной отметки НУ (рис. 12.1). Датчики уровня представляют собой токопроводные стержни, имеющие релейную статическую характеристику (см. рис. 3.1, в) в зависимости от электрического сопротивления слоя топлива. На каждом бункере 1 или 2 устанавливают один датчик нижнего уровня 5 и один или несколько (по числу загрузочных люков) датчиков верхнего уровня 6, которые располагаются в непосредственной близости от загрузочных люков 4. Разгрузку бункеров в последующую за ними систему пылеприготовления производят через шиберы-дозаторы 3. Нормально замкнутые контакты датчика нижнего уровня размыкаются при понижении уровня угля ниже

электрода и включают реле автоматического пуска тракта (РАП), которое в свою очередь включает реле времени и промежуточные реле в схеме пуска механизмов и предупреждающей сигнализации. Последняя оповещает дежурный персонал топливоподачи о предстоящем включении транспортеров и механизмов.

Автоматическое регулирование загрузки бункеров углем. Бункера сырого угля (БСУ) служат конечным звеном технологической цепи топливоподачи (рис. 12.1). Они располагаются вдоль последнего транспортера 11 и загружаются с помощью неподвижного загрузочного устройства — плужковых сбрасывателей 10. Их рабочим органом служит остроугольный отвал (плужок), устанавливаемый навстречу движению угля. Плужок может находиться в двух положениях: верхнем, когда он не касается транспортерной ленты, и нижнем, когда он прижат к ней. При верхнем положении плужка слой угля на ленте проходит под ним к другим бункерам, при нижнем уголь скользит вдоль боковых отвалов плужка и ссыпается в БСУ. Перемещение плужка осуществляется электрическим исполнительным механизмом 8 (ИМ) посредством тросовой или рычажной передачи 9. При установке переключателя управления плужковыми сбрасывателями в положение «автоматика» их ИМ подготовлены к автоматическому пуску. «Разрешение» на автоматический пуск поступает после включения промежуточного реле, срабатывающего по сигналу реле автоматического пуска транспортеров. Загрузка производится только в бункера, где уголь еще не достиг верхнего уровня (ВУ). Питание цепей опускания плужков осуществляется через нормально открытые контакты, чем обеспечивается принятая последовательность загрузки БСУ. Питание цепей подъема каждого плужкового сбрасывателя осуществляется независимо. После окончания засыпки первых бункеров до верхнего уровня 6, а последнего до среднего 7 осуществляется автоматический останов системы топливоподачи через реле времени и промежуточное реле останова. Тракт топливоподачи останавливается последовательно начиная с лопастных питателей. Рассыпка угля, оставшегося на лентах, производится в последний по ходу топлива (второй на рис. 12.1) бункер. Плужок этого бункера всегда находится в опущенном положении, а его засыпка в нормальном режиме происходит лишь до среднего уровня (СУ) с тем расчетом, чтобы оставшийся на транспортерах уголь заполнил его свободный объем после непредвиденного останова лопастного питателя.

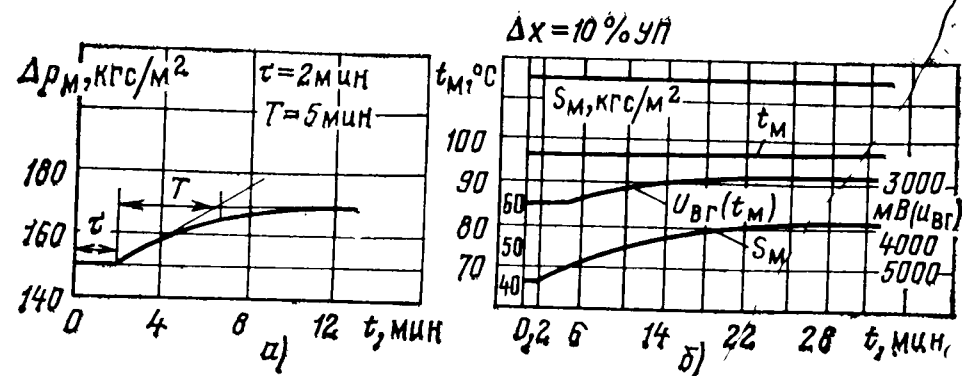


Рис. 12.3. Временные характеристики шаровой барабанной мельницы при возмущении расходом сырого угля:
 а — по изменению сопротивления мельницы Δp_m ; б — по температуре t_m и разрежению S_m ; U_{Br} — сигнал на выходе измерительного блока автоматического регулятора

воздуха Δp_m растет до определенного предела пропорционально загрузке мельницы. Характер динамики этого участка можно установить по кривой переходного процесса, снятой по каналу *положение ножа питателя сырого угля* УП — Δp_m , приведенной на рис. 12.3, а. Этому участку свойственны значительная инерция и самовыравнивание.

Известен также ряд других показателей загрузки мельниц / уровень «шума» вращающегося барабана, вибрация подшипников, магнитная проницаемость шаротопливной массы и др. /. Однако в настоящее время они не нашли широкого применения ввиду недостаточной надежности и представительности.

Помимо экономичности, мельница должна обеспечивать заданное качество пыли, определяемое тониной помола и влажностью. Чем тоньше пыль, тем меньше тепловые потери от механического недожога в топке (q_4). Однако требования тонины помола и экономичности работы мельницы противоречивы. Поэтому оптимальная тонина помола определяется по минимуму суммы удельного расхода электроэнергии и потерь теплоты q_4 , приведенных к единому энергетическому эквиваленту. Тонина помола пыли, поступающей в промбункер, определяется в основном положением створок сепаратора, сбрасывающего крупные фракции пыли в мельницу для повторного размалывания. Положение створок, соответствующее оптимальной тонине помола, устанавливается в результате испытаний при наладке пылесистемы и остается неизменным в процессе нормальной эксплуатации для определенного сорта угля. Влажность пыли на выходе из мельницы или степень ее подсушки

устанавливается по условиям процесса сжигания и нормальной работы пылепитателей, а также по условиям взрывобезопасности аэросмеси, заполняющей систему пылеприготовления. Чрезмерная влажность пыли ухудшает ее воспламенение, приводит к ее зависанию в бункерах и нарушению нормальной работы топливоподающих устройств («замазывание» пылепитателей, забивание пылепроводов и т. п.). Наоборот, чрезмерная подсушка пыли чревата взрывом аэросмеси взрывоопасных углей и вызывает излишнюю текучесть пыли, что приводит к неуправляемому поступлению топлива в топку с первичным воздухом при остановленном пылепитателе. Косвенным показателем влажности пыли служит температура аэросмеси за мельницей t_m , которую можно легко измерить, например, термометром сопротивления.

Правила технической эксплуатации [26] устанавливают следующие максимально допустимые значения температуры аэросмеси за мельницей: для топлив с влажностью до 25 % + 70 °С; для топлив с влажностью свыше 25 % + 80 °С; для тощих углей + 100 °С.

При настройке системы регулирования температуры в качестве оптимальной принимается t_m на 3—5 °С ниже максимально допустимой. Представление о динамических свойствах участка регулирования мельницы по температуре аэросмеси дает экспериментальная кривая разгона, снятая по каналу заслонки на подводе греющего воздуха, t_m (рис. 12.3, б).

Динамические свойства основных параметров мельницы зависят не только от инерционности термоприемника, но также от производительности мельницы, ее загрузки, сорта угля, температуры и расхода сушильного агента, сорта шаров и других факторов.

Способы и схемы регулирования. Наиболее распространенным типом системы пылеприготовления с шаровой барабанной мельницей служит одновентиляторная система с использованием в качестве сушильного агента смеси горячего и слабо подогретого воздуха (см. рис. 12.2).

Регулирование загрузки. Стабилизация загрузки осуществляется воздействием на положение ножа питателя сырого угля (ленточного или тарельчатого) в зависимости от выбранного регулируемого параметра, например перепада давлений на мельнице. Однако подачу мельницы желательно поддерживать не постоянной, а несколько изменять в зависимости от вентиляции (уменьшать производительность с увеличением вентиляции и наоборот). Это позволит ста-

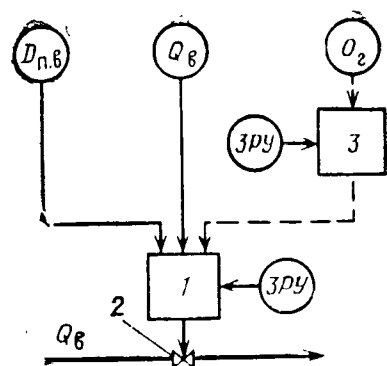


Рис. 12.4. АСР загрузки мельницы

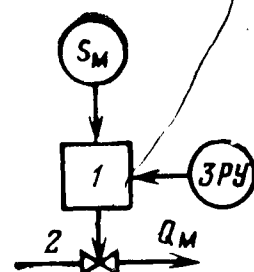


Рис. 12.5. АСР разрежения перед мельницей

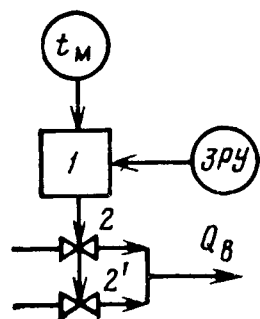


Рис. 12.6. АСР температуры за мельницей

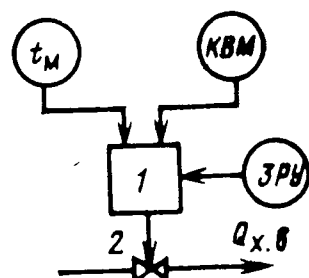


Рис. 12.7. Система защиты от повышения температуры аэросмеси за мельницей

билизировать тонину помола при нарушениях воздушного режима мельницы: угрубление размолы пыли, вызванное увеличением расхода воздуха, будет компенсироваться уменьшением загрузки мельницы. Этому условию удовлетворяет схема автоматического регулирования подачи мельницы с двухимпульсным регулятором 1 (рис. 12.4): по перепаду давлений на мельнице (вариант а) или уровню пыли (вариант б) и с жесткой обратной связью по положению регулирующего органа — питателя сырого угля. Вариант «б» применяется реже ввиду недостаточной надежности отборного устройства по измерению уровня пыли.

Регулирование разрежения перед мельницей. Шаровая мельница должна находиться под разрежением для предотвращения выбивания пыли из ее горловин. Для этого может быть предусмотрена отдельная АСР разрежения перед мельницей (рис. 12.5). Входным сигналом ПИ-регулятора 1 служит разрежение перед мельницей S_m . Регулятор воздействует на заслонку 2 на линии подвода общего греющего воздуха к мельнице.

Регулирование температуры аэросмеси за мельницей. Температура за мельницей t_m стабилизируется в заданных пределах воздействием на расход смеси слабо подогретого и горячего воздуха. Схема регулирования показана на рис. 12.6. ПИ-регулятор 1 получает сигнал от датчика тем-

пературы аэросмеси и через исполнительный механизм перемещает в нужном направлении спаренные заслонки 2 и 2', установленные на линиях слабо подогретого и горячего воздуха. Сочленения исполнительного механизма со спаренными заслонками выполняются так, чтобы при открытии одной из них вторая закрывалась, и наоборот, с тем, чтобы общий расход воздуха на мельницу Q_v оставался неизменным.

В пылесистемах со взрывоопасными топливами, кроме регулятора температуры аэросмеси, предусматривается устройство автоматического открытия заслонки на линии присадки холодного воздуха (заслонка 2 на рис. 12.7), которое срабатывает при повышении t_m сверх допустимого значения. Автоматическое открытие присадки осуществляется при размыкании концевого или путевого выключателя «меньше» исполнительного механизма регулятора температуры 1 в случае, когда его регулируемый диапазон исчерпан.

Регулирование давления первичного воздуха. Скорость аэросмеси в пылепроводах к горелкам котлов с промежуточным бункером должна быть постоянной независимо от паровой нагрузки и суммарного расхода воздуха. Это условие необходимо соблюдать из-за опасности забивания пылепроводов.

Регулирование подачи первичного воздуха в пылепроводы осуществляется с помощью ПИ-регулятора давления, получающего сигнал по давлению воздуха в коробе первичного воздуха и воздействующего на производительность первичного воздуха или на дроссельные заслонки, установленные на отводах общего воздуха в короб первичного воздуха.

Регулирование молотковых мельниц. При камерном способе сжигания легко воспламеняющихся сортов топлива применяют пылесистемы с непосредственным вдуванием пыли в топку (рис. 12.8). Размол топлива осуществляется в молотковой быстроходной мельнице 2. В ней же начинается подогрев аэросмеси и завершается в шахте 3, соединяющей ее с топкой 4. В отличие от шаровой мельницы, работающей на промежуточный бункер, подача молотковой мельницы непосредственно определяет расход топлива, поступающего в топку из бункера 1. Поэтому система регулирования подачи молотковой мельницы тесно связана с работой регуляторов тепловой нагрузки котла. АСР загрузки мельницы 9 должна также поддерживать требуемую подачу топлива и оптимальную тонину помола пыли.

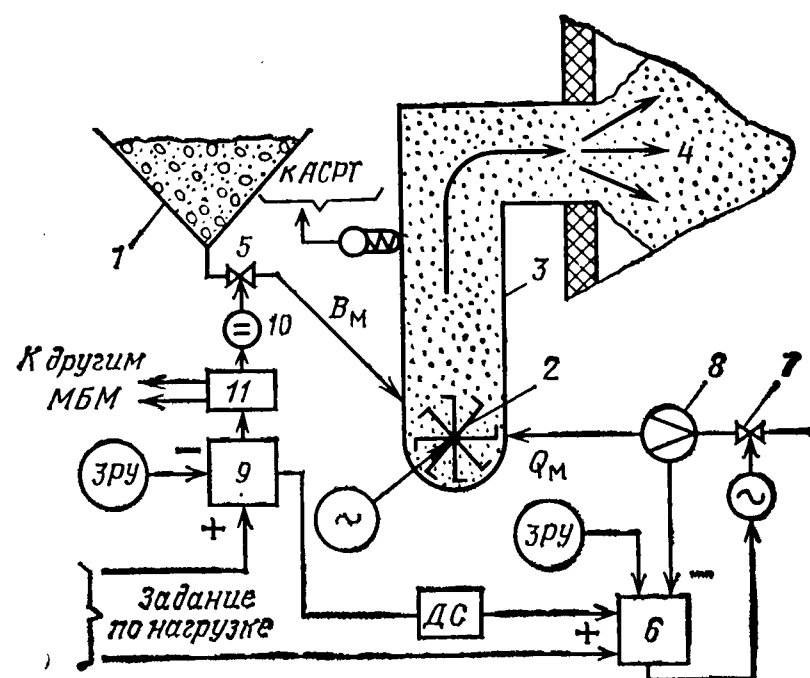
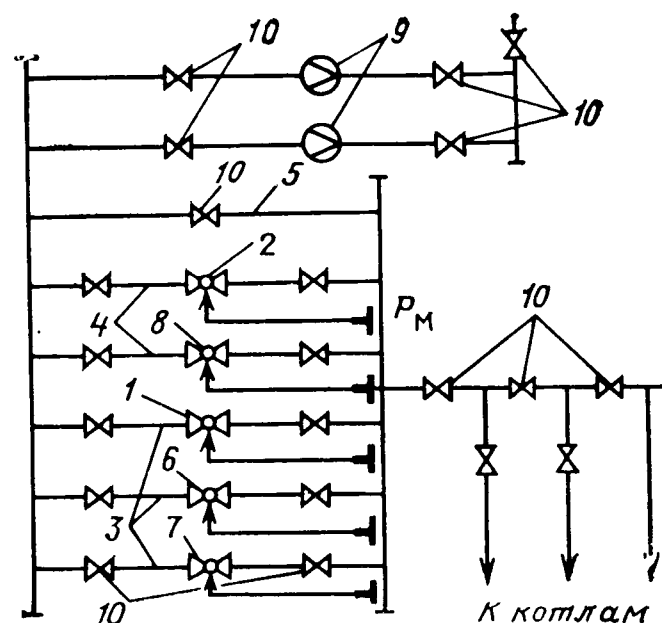


Рис. 12.8. Молотковая мельница (принципиальная схема регулирования)

Обычно на одном паровом котле устанавливается несколько молотковых быстроходных мельниц. Их подача регулируется воздействием на частоту вращения приводного барабана ленточного питателя сырого угля 5, управляемого электроприводом с регулируемой частотой вращения 10. Управляющий сигнал может формироваться, например, системой регулирования скорости вращения электродвигателей питателей сырого угля 11 (АРСП), управляющей одновременно несколькими приводами (см. § 13.3). Стабилизация требуемой тонины помола пыли осуществляется с помощью регулятора расхода первичного воздуха 6, действующего на заслонку 7 по перепаду давлений на сужающем устройстве 8, установленном на подводе греющего воздуха к мельнице. Изменение подачи мельницы при воздействии на ее загрузку происходит со значительной инерцией. Более быстрое изменение количества вдуваемой в топку пыли осуществляется изменением расхода аэросмеси путем изменения заданий регулятору общего воздуха. Для стабилизации влажности пыли в заданных пределах предусматривается регулятор температуры аэросмеси за мельницей, действующий на изменение соотношения расходов горячего и слабо подогретого воздуха таким же способом, как в системе регулирования температуры шаровых барабанных мельниц (см. рис. 12.7).

Рис. 12.9. Схема подачи и регулирования газового топлива на ТЭС



Автоматизация газораспределительных пунктов. Снабжение тепловых электростанций газом осуществляется от газораспределительных станций (ГРС) через газораспределительные пункты (ГРП), рис. 12.9.

В ГРП газ редуцируется до давления 0,15—0,2 МПа (1,5—2 кгс/см²) с помощью регулирующих клапанов, управляемых автоматическими регуляторами давления. С выхода ГРП газ поступает в общий газопровод ТЭС, снабжающий паровые котлы газовым топливом. В ГРП имеются рабочие нитки газопровода, одна или две нитки малого расхода и резервная с ручным управлением арматурой. На рабочих нитках и нитках малого расхода устанавливаются автоматические регуляторы давления, действующие по принципу «после себя», и защитные регуляторы, действующие по тому же принципу. Защитные регуляторы настраиваются на поддержание повышенного давления по сравнению с рабочим. При работе в расчетном диапазоне нагрузок они полностью открыты.

Автоматическое регулирование подачи газового топлива при его расходах в расчетном диапазоне осуществляется обычно одним из рабочих регуляторов, установленных на рабочей нитке. Другой настраивается на несколько меньшее давление и, как правило, полностью закрыт или частично открыт, выполняя роль автоматического резерва снабжения топливом при его нехватке или недостаточном напоре со стороны источника (от газорегуляторной станции).

При ограниченном снабжении ТЭС газовым топливом включаются нитки и регуляторы малого расхода. В каче-

стве автоматических и защитных регуляторов, как правило, используются П-регуляторы давления прямого действия с мембранным исполнительным механизмом (см. рис. 1.1 и 6.9). В качестве источника энергии для управления исполнительным механизмом используется давление самого природного газа.

12.3. АВТОМАТИЗАЦИЯ УСТАНОВОК ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ

Исходная природная вода от насосов водоснабжения предварительно подогревается в теплообменнике и поступает в осветлители, где осуществляется переход некоторых растворенных примесей в нерастворимые твердые вещества за счет добавления специальных химических реагентов в виде растворов определенной дозировки. Осветленная вода поступает в накопительные баки, а оттуда с помощью насосов прокачивается через группу механических фильтров, в которых задерживаются выделенные в осветлителях нерастворимые твердые вещества (шлам). Затем поток воды раздваивается: часть воды, необходимая для подпитки теплосети, пропускается через фильтры химического умягчения, другая часть, требующаяся для восполнения потерь питательной воды паровых котлов, проходит через обессоливающую установку. Удаление кислорода из обоих пото-

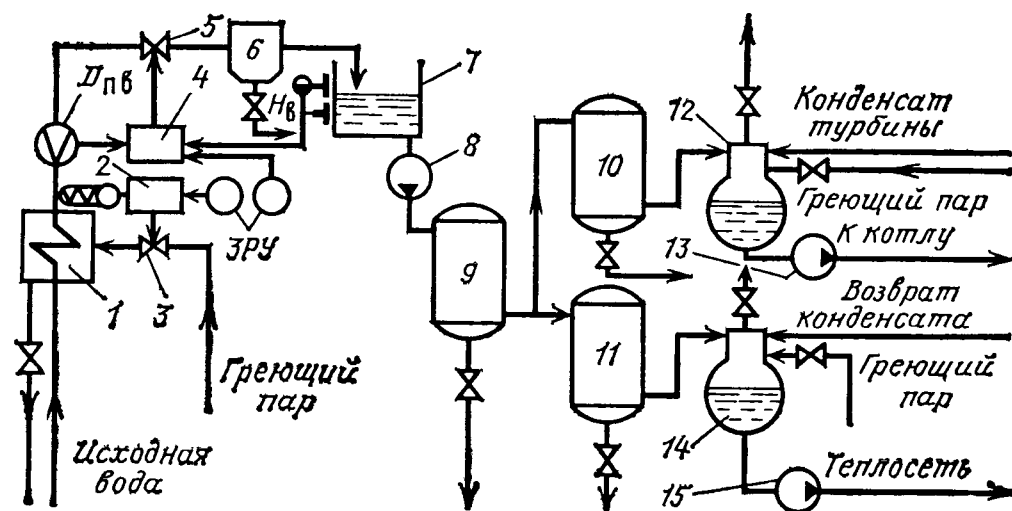


Рис. 12.10. Установка химической подготовки питательной воды (принципиальная технологическая схема):

1 — водоподогреватель сырой воды; 2 — регулятор температуры подогрева исходной воды; 3, 5 — регулирующие клапаны; 4 — регулятор производительности установки; 6 — осветлитель; 7 — накопительный бак; 8 — насос; 9 — механический фильтр; 10 — обессоливающая установка; 11 — фильтры химического умягчения; 12, 14 — деаэраторы; 13, 15 — питательный и подпиточный насосы

ков воды осуществляется отдельно в деаэраторных установках.

Технологические операции по химической очистке воды по условиям автоматизации можно разделить на операции, требующие непрерывного регулирования, и операции, осуществляемые периодически — один или несколько раз в сутки. К непрерывным процессам химической очистки воды относится регулирование подогрева исходной воды, производительности водоподготовительной установки, дозировки реагентов и уровня шлама в осветлителях.

Периодические операции включают приготовление растворов реагентов, отключение фильтров на промывку, промывку механических и регенерацию (восстановление фильтрующих способностей) химических фильтров.

Автоматическое регулирование непрерывных процессов. *Регулирование температуры исходной воды.* Поддержание заданного значения температуры исходной воды необходимо по условиям нормального протекания химических реакций в осветлительных и химических фильтрах. Подогрев воды осуществляется в поверхностном пароводяном теплообменнике, который по своим динамическим свойствам является типичным тепловым объектом. Принципиальная схема одноконтурной автоматической системы подогрева исходной воды с ПИ-регулятором температуры изображена на рис. 12.10.

Регулирование подачи воды. Косвенным показателем соответствия нагрузки химочистки количеству требуемых добавок в тепловую схему ТЭС служит уровень воды в промежуточных баках.

На рис. 12.10 изображена принципиальная схема двухконтурной АСР подачи воды. Заданием регулятору подачи, воздействующему на расход исходной воды, служит ее уровень в баке. В качестве сигнала, стабилизирующего работу системы, используется перепад на измерительной диафрагме, установленной на линии исходной воды. Регулятор в этом случае работает с остаточным отклонением по уровню в баке, что вполне допустимо для подобных объектов. Помимо этого, измерительный блок регулятора 4 должен обладать зоной нечувствительности по уровню (до 20—30 % всего диапазона изменений уровня), для того чтобы не изменять задание регулятору по нагрузке при колебаниях уровня воды в накопительных баках в этих пределах.

Автоматическое дозирование реагентов, поступающих в осветлитель. В осветлитель одновременно могут подаваться два или три реагента. В качестве реагентов обычно используется раствор извести в виде известкового молока, порошок магнезит, транспортируемый в осветлитель с помощью смывной воды. Раствор коагулянта добавляется в осветлитель для укрупнения (коагуляции) мелкодисперсных коллоидных частиц.

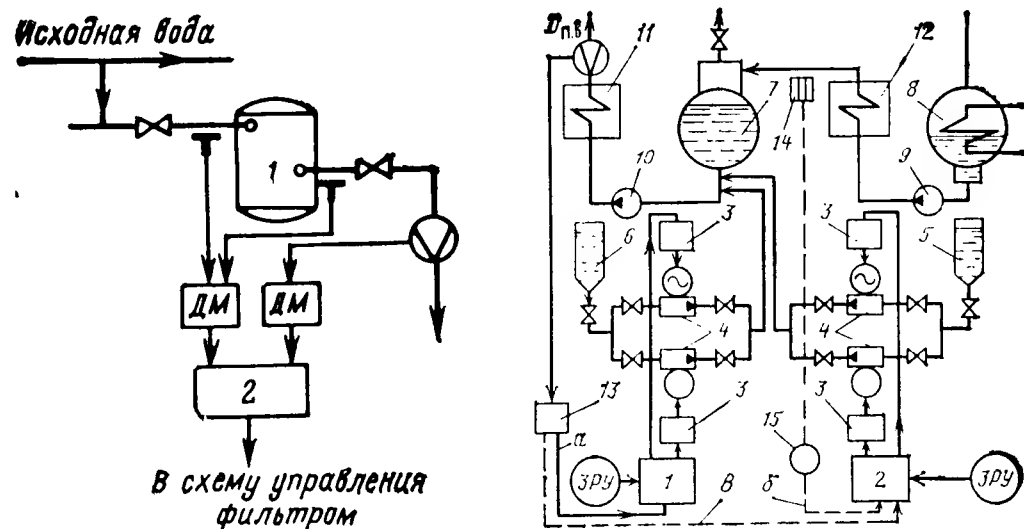


Рис. 12.13. Схема автоматического отключения фильтров на промывку

Рис. 12.14. Автоматизация ввода в питательную воду аммиака и гидразина:

а, в — количественное регулирование; б — качественное регулирование; 1 — регулятор ввода гидразина; 2 — регулятор ввода аммиака; 3 — электромагнитные муфты скольжения; 4 — плунжерные насосы-дозаторы; 5 — бак раствора аммиака; 6 — бак раствора гидразина; 7 — деаэратор; 8 — конденсатор; 9, 10 — конденсатный и питательный насосы; 11 — группа ПВД; 12 — группа ПИД; 13 — разноточный датчик; 14 — отборное устройство аммиакомера; 15 — кондуктометрический датчик

верхностей нагрева. Схема автоматического регулирования ввода аммиака показана на рис. 12.14 (вариант а). Регулятор подачи 2 насоса-дозатора 4 получает сигнал по расходу питательной воды и действует по принципу импульсатора, увеличивая или уменьшая частоту включения электропривода плунжерного насоса-дозатора, а тем самым его подачи в зависимости от изменения расхода питательной воды. Действие регулятора может корректироваться по сигналу электропроводности питательной воды (вариант б). По тому же принципу осуществляется автоматическое регулирование ввода раствора гидразина, поглощающего остаточный кислород, не удаленный термическим деаэрированием (вариант в). В обеих системах предусматривается установка двух насосов-дозаторов: рабочего и резервного.

Автоматизация установки для очистки конденсатора. Современные блочные установки оборудуются конденсатоочисткой (рис. 12.15) для предотвращения остановок блока из-за ухудшения качества питательной воды вследствие присосов охлаждающей воды в местах повреждения трубок в конденсаторе 2 турбины 1.

Установка конденсатоочистки включается между конденсатными насосами первого 3 и второго 6 подъемов и состоит из химических

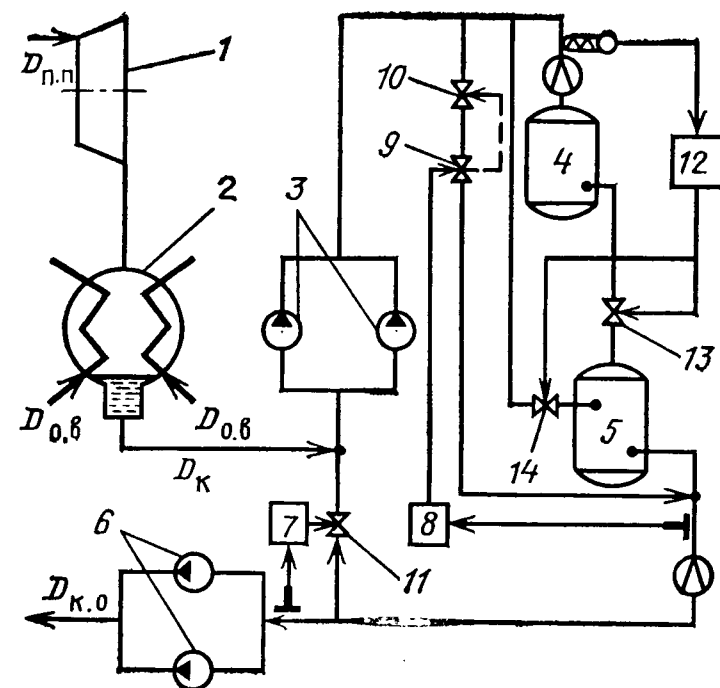


Рис. 12.15. Автоматизация конденсатоочистки

фильтров двух ступеней: Н-катионитовых 5, задерживающих взвеси окислов железа и растворенный в воде аммиак, и фильтров смешанного действия 4, связывающих кремнекислоту. На конденсатоочистке устанавливают два регулятора давления (РД) «до себя» 7 и 8. Один из них — РД8 служит защитным регулятором от появления вакуума на всасе конденсатных насосов второго подъема и действует на регулирующий клапан 9 на линии обвода фильтров. При достижении избыточным давлением конденсата на всасе насосов 6 заданного значения РД8 закрывает запорную задвижку 10. Рабочий регулятор РД7 настраивается на поддержание большего избыточного давления на всасе насосов второго подъема по отношению к РД8 и воздействует на регулирующий клапан 11 на линии отвода. Защитный регулятор 12 от повышения температуры перед фильтрами смешанного действия работает по сигналу температуры конденсата и при $t_k \geq 40^\circ\text{C}$ переключает воду в обвод фильтров 4, воздействуя на закрытие задвижки 13 и открытие задвижки 14.

12.4. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ДЕАЭРАТОРНЫХ УСТАНОВОК

Характеристика объекта регулирования. Деаэратор является смешивающим подогревателем и предназначен для деаэрации питательной воды — удаления растворенного в ней кислорода. В нижнюю часть деаэрационной головки 2, установленной над аккумуляторным баком 1 питательной

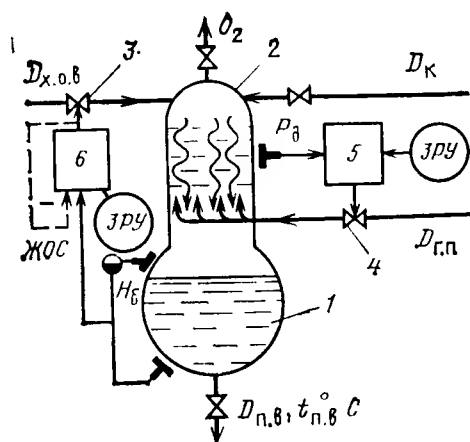


Рис. 12.16. Автоматическое регулирование деаэрационной установки

ветствующая ему температура насыщения $t_d = t_{п.в}$ и уровень H_d .

Деаэратор является типичным теплотехническим объектом. Его динамические свойства по давлению описываются выражением (2.21), по уровню — (2.22), где $\tau/T = 0,0 \div 0,2$.

Схемы регулирования уровня воды в аккумуляторном баке H_d и избыточного давления пара в деаэрационной головке p_d изображены на рис. 12.16.

Входным сигналом П- или ПИ-регулятора уровня 6, воздействующего на перемещение клапана 3 на линии химически очищенной воды, служит уровень воды H_d . Обычно регулятор уровня снабжается вторым входным сигналом, являющимся жесткой отрицательной обратной связью (ЖОС) по положению регулирующего органа для сообщения автоматической системе должного запаса устойчивости.

Входным сигналом регулятора давления 5, который воздействует на регулируемую заслонку 4 на линии греющего пара, служит давление p_d . Из-за необходимости точного поддержания $t_{п.в}$ регулятор давления должен реализовать ПИ-закон регулирования.

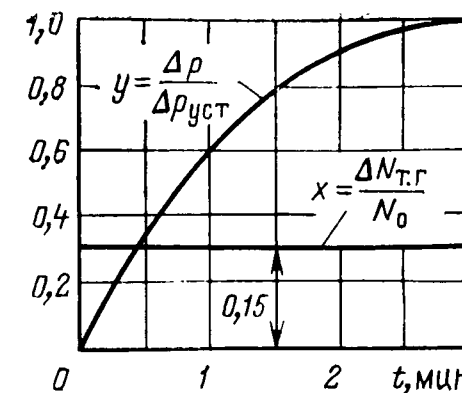
При параллельной работе группы деаэраторов регулятор давления и регулятор уровня воздействуют на соответствующие регулирующие клапаны на линиях общего подвода пара и химически очищенной воды.

12.5. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕДУКЦИОННО-ОХЛАДИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

В РОУ осуществляется понижение давления пара за счет пропуска его через редукционный клапан и понижение

воды, подводится греющий пар (рис. 12.16). Поток пара, стремясь к выходу в атмосферу, расположенному в верхней части головки, нагревает до температуры кипения движущуюся навстречу ему питательную воду. Выделившийся из воды в процессе кипения кислород вместе с излишками пара сбрасывается в атмосферу или расширитель. Для непрерывного нагрева и удаления кислорода из воды в деаэраторе поддерживается избыточное давление пара p_d , соот-

Рис. 12.17. Кривая разгона РОУ по давлению пара при возмущении расходом перегретого пара $D_{п.п}$ (регулирующими клапанами турбины — $h_{кп}$)



температуры пара за счет впрыска охлаждающей воды в коллектор редуцированного пара. С помощью РОУ резервируются промышленные и теплофикационные отборы паровых турбин, осуществляется связь между общими паропроводами паровых котлов высокого и среднего давления. Для перепуска первичного пара в обвод турбин в случае их внезапного останова предусматриваются быстродействующие РОУ (БРОУ). В этом случае излишек пара от паровых котлов сбрасывается через БРОУ в конденсатор турбины.

При наличии производственного потребителя, не допускающего перерывов в снабжении паром, промышленные отборы турбин резервируются также с помощью БРОУ, находящихся в состоянии горячего резерва. Точность поддержания давления и температуры редуцированного пара диктуется потребителем или, в случае сброса редуцированного пара в конденсатор, условиями его безопасной работы.

Как объекты управления РОУ и БРОУ представляют собой динамические системы с двумя входными регулирующими воздействиями $D_{п.п}$ и $D_{о.в}$ и тремя регулируемыми величинами: $D_{р.п}$, $p_{р.п}$ и $t_{р.п}$. Структурная схема этих связей представлена на рис. 1.5.

Динамические свойства РОУ по каналам $D_{п.п} - t_{р.п}$ и $D_{о.в} - t_{р.п}$ определяются в основном инерционностью температурного датчика (термопары).

Кривая переходного процесса РОУ по давлению пара по каналу приведена на рис. 12.17.

Если редуцирующее устройство установлено в параллель с турбиной и служит для перепуска пара в конденсатор при внезапных сбросах электрической нагрузки турбогенератора, быстродействующие клапаны открываются при повышении давления пара перед БРОУ сверх допустимого или закрытии стопорного клапана перед турбиной. Регуля-

тор давления РОУ в этом случае работает по сигналу давления пара перед редукционным клапаном и осуществляет принцип регулирования давления пара «до себя».

12.6. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ УСТАНОВОК

Регулирование подогревателей сетевой воды. Подогреватель теплофикационной сетевой воды предназначен для ее подогрева до требуемой температуры, значение которой задается в зависимости от температуры наружного воздуха. Подогреватель представляет собой поверхностный теплообменник 1 (рис. 12.18), по змеевикам которого с помощью сетевого насоса 10 прокачивается вода. Снаружи змеевики обогреваются паром. Источником греющего пара обычно служат отборы паровых турбин или резервирующие их РОУ. Основной регулируемой величиной подогревателя служит температура прямой сетевой воды $t_{с.в.}$. Последнюю требуется поддерживать на заданном значении с высокой точностью, что диктуется не только тепловым потребителем, но и условиями экономичной работы теплофикационных турбин.

Второй регулируемой величиной служит уровень конденсата греющего пара в корпусе подогревателя H_k , среднее значение которого следует поддерживать постоянным по условиям оптимального теплообмена в подогревателе и опасности заброса воды в трубопровод греющего пара.

Сетевая вода циркулирует обычно по замкнутому контуру насос — подогреватель — тепловая сеть — насос. При этом неизбежные потери воды в тепловой сети восполняются за счет подпиточной воды, которая поступает на всас сетевых насосов благодаря некоторому избыточному

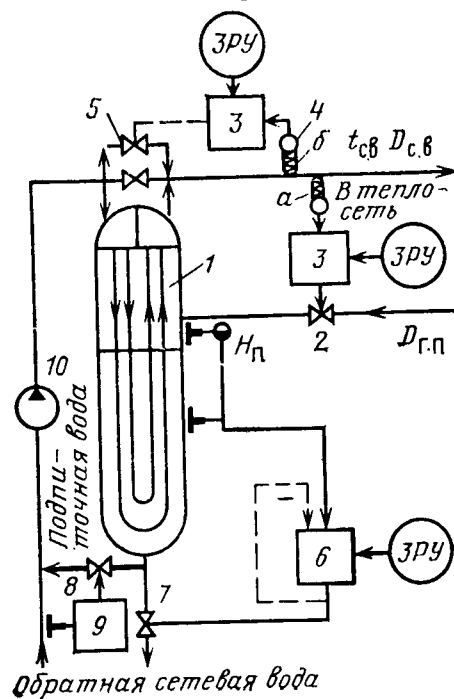


Рис. 12.18. Подогреватель сетевой воды (принципиальная схема АСР):

1 — корпус подогревателя; 2 — регулирующая заслонка; 3 — регулятор температуры; 4 — термодатчики; 5 — регулирующий клапан на линии обвода; 6 — регулятор уровня конденсата; 7, 8 — регулирующие клапаны; 9 — регулятор давления обратной сетевой воды; 10 — сетевой насос

давлению. Потери воды в сети имеют характер случайных и неконтролируемых возмущений. Поэтому желательно предусматривать автоматическое регулирование расхода подпиточной воды в зависимости от давления обратной сетевой воды.

Подогреватель как объект управления разделяется на три самостоятельных участка: температуры прямой сетевой воды $t_{с.в.}$, уровня конденсата в корпусе H_k и давления обратной сетевой воды $p_{с.в.}$.

Регулирование температуры прямой сетевой воды может осуществляться тремя способами. При первом способе (рис. 12.18, вариант а) регулятор температуры 3 получает сигнал по $t_{с.в.}$ и воздействует на перемещение регулирующей заслонки 2 на трубопроводе греющего пара. Судя по графику $t_{с.в.}=f(t)$ (рис. 12.19), этому участку свойственна значительная инерция. Для обеспечения требуемой точности поддержания регулируемой величины при этом варианте могут потребоваться относительно большие перемещения регулирующей заслонки, что может привести к существенным колебаниям давления пара в отборах турбины и нестационарным режимам работы турбины в целом.

Чтобы избежать этого, температуру прямой сетевой воды можно регулировать другим способом: перепуском части обратной сетевой воды через клапан 5 в обвод подогревателя в трубопровод прямой сетевой воды путем смешения подогретого и холодного потоков сетевой воды (рис. 12.18, вариант б). Помимо уменьшения инерционности регулируемого участка, второй способ регулирования позволяет сохранить неизменным расход греющего пара и тем самым способствовать стабилизации давления в теплофикационных отборах турбины. Однако этот метод не экономичен и эффективен лишь при значительных перепадах температур обратной и прямой сетевой воды (не менее 20—30 °С).

Для регулирования $t_{с.в.}$ обычно используются ПИ-регуляторы с автоматическим или ручным изменением задания в зависимости от температуры наружного воздуха.

Третий наиболее экономичный способ предусматривает поддержание $t_{с.в.}$ при полностью открытой регулирующей заслонке 2 путем плавного регулирования давления пара в теплофикационном отборе с помощью системы регулирования паровой турбины и специального автоматического задатчика температуры, действующих в зависимости от электрической нагрузки турбогенератора и температуры наружного воздуха.

Регулирование уровня H_k осуществляется регулятором 6, который получает сигналы по уровню конденсата в корпусе и по положению регулирующего органа. Регулятор

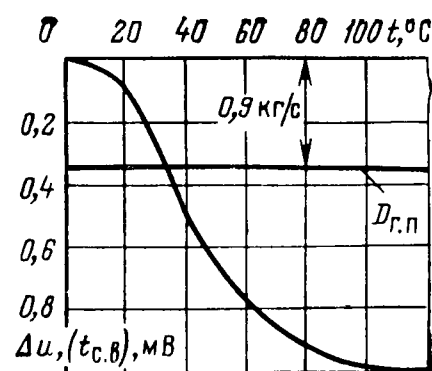


Рис. 12.19. Кривая разгона подогревателя по температуре сетевой воды по каналу регулирующего воздействия

воздействует на открытие или закрытие клапана 7 на линии слива конденсата. Регулятором расхода подпиточной воды служит регулятор 9, работающий по принципу регулирования давления «после себя» и воздействующий на клапан 8, установленный на трубопроводе подпитки.

12.7. АВТОМАТИЗАЦИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ПАРОВЫХ ТУРБИН

Автоматическое регулирование подачи пара на лабиринтовые уплотнения турбин.

Уплотнения препятствуют утечке пара в атмосферу и проникновению воздуха в корпус турбины. Давление пара в местах уплотнений является переменной величиной в зависимости от нагрузки турбогенератора. Это вынуждает снабжать технологическую схему подачи пара к уплотнениям автоматической системой регулирования.

Схематическое изображение лабиринтовых уплотнений 2 и 3 одноцилиндровой турбины 1 и АСР давления 4 приводится на рис. 12.20. Промежуточные камеры уплотнения 2' и 3' находятся под избыточным давлением, подводимым от внешнего источника. Обычно используется пар переднего уплотнения турбины, всегда находящегося под избыточным давлением, или греющий пар от коллектора собственных нужд ТЭС. Из промежуточной камеры 2' пар попадает в вестовую трубу, а с другой стороны — в корпус турбины. Избыточное давление пара в промежуточной камере должно поддерживаться в пределах 3—5 кПа (0,03—0,05 кгс/см²).

В АСР подачи пара на уплотнения используется регулятор давления 5 «до себя». Он поддерживает необходимое избыточное давление в коллекторе уплотнений путем

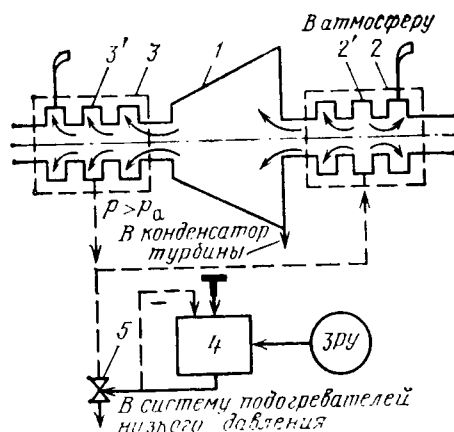


Рис. 12.20. Система регулирования давления пара в лабиринтовых уплотнениях турбины

воздействия на положение регулирующей заслонки, расположенной на трубопроводе отсоса пара из переднего уплотнения в эжектор или систему подогревателей низкого давления. Регулятор снабжен ЖОС по положению регулирующего органа.

Автоматическое регулирование уровня воды в конденсаторах паровых турбин

Положение уровня регулируется путем изменения подачи конденсатных насосов, которую, однако, нельзя уменьшить ниже определенного предела, задаваемого минимальным пропуском конденсата через эжекторы и систему регенеративных подогревателей. Поэтому при малых нагрузках турбины часть конденсата с напорной стороны конденсатных насосов должна вновь сбрасываться в конденсатор. С учетом этого требования и выполняется система регулирования уровня воды в конденсаторе. Схема АСР для конденсаторов турбин средней мощности изображена на рис. 12.21.

Как объект управления конденсатор 1 представляет собой герметический бак с насосом на стоке и не обладает свойством самовыравнивания по уровню. Регулирование уровня воды осуществляется изменением расхода конденсата после насосов 5 путем воздействия на двухпоточный клапан 3 и 4.

При снижении уровня вследствие сброса нагрузки турбины закрывается рабочий клапан 4, но обеспечивает требуемый нерегулируемый пропуск воды в систему охлаждения эжекторов 6 и регенеративных подогревателей. При дальнейшем снижении уровня начинает открываться клапан рециркуляции 3, поддерживая уровень воды в

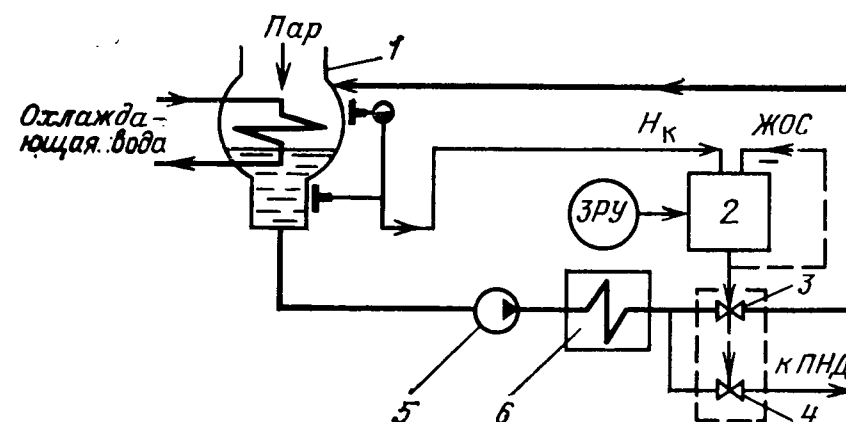


Рис. 12.21. Система регулирования уровня конденсата в конденсаторе турбины

конденсаторе. Для удобства управления и согласованности в работе клапаны 3 и 4 выполнены в одном корпусе и управляются одним исполнительным механизмом. Обычно на регулятор уровня 2 поступают два входных сигнала: по уровню конденсата H_k и ЖОС по положению регулирующего органа.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные периодические операции по автоматическому управлению топливоподачей.
2. Как осуществляется автоматическая загрузка бункеров углем?
3. Поясните динамические свойства мельницы по температуре аэросмеси.
4. Какие сигналы характеризуют загрузку мельницы углем?
5. Поясните действие АСР загрузки мельницы и температуры аэросмеси на выходе.
6. Поясните действие АСР загрузки молотковой мельницы.
7. Назовите регулируемые величины РОУ.
8. Поясните динамические свойства и действия АСР подогревателей сетевой воды.
9. Назовите регулируемые величины деаэрационной установки и поясните действие АСР.
10. Поясните действие АСР уровня воды в конденсаторе турбины.
11. Как действует автоматический регулятор подачи пара к уплотнениям турбины?
12. Назовите непрерывно действующие АСР установок химической очистки воды.
13. Поясните действие АСР производительности установки водоподготовки.
14. Как осуществляется автоматическое регулирование шламового режима в осветлителях?
15. Как осуществляется автоматическое отключение фильтров на промывку и регенерацию?
16. Поясните действие АСР ввода аммиака и гидразина.
17. Поясните действие АСР конденсатоочистки.

Глава тринадцатая

ДИСТАНЦИОННОЕ И ЛОГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ

13.1. СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Управление на расстоянии силовыми приводами машин и механизмов осуществляется системой дистанционного управления (ДУ). Объектами ДУ служат электроприводы запорных и регулирующих органов, а также электроприводы вспомогательных вращающихся механизмов (углеразмольных мельниц, насосов, вентиляторов и т. п.), являющихся основными потребителями электроэнергии на собственных нужды ТЭС.

Системы ДУ состоят из электропривода, силового коммутационного устройства и аппаратуры управления. Электроприводами исполнительных механизмов ДУ служат асинхронные двигатели переменного тока мощностью от 0,15 до 0,4 кВт, работающие при напряжении 220/380 В. Электроприводами вращающихся механизмов собственных нужд ТЭС служат асинхронные и синхронные двигатели переменного тока мощностью от 10 до 8000 кВт, работающие при напряжении от 0,4 до 6 кВ, а также электродвигатели постоянного тока мощностью от 2 до 10 кВт, работающие при напряжении 220 В.

Силовыми коммутационными устройствами исполнительных механизмов и электроприводов запорных и регулирующих органов служат контактные реверсивные магнитные контакторы и бесконтактные магнитные и тиристорные усилители различных типов в зависимости от мощности двигателей. Для коммутации мощных (от 55 кВт и более) высоковольтных двигателей собственных нужд применяют масляные выключатели с соленоидными приводами; для коммутации низковольтных — воздушные автоматические выключатели, а для коммутации маломощных двигателей — магнитные контакторы в комплекте с защитными автоматическими устройствами. Силовая коммутационная аппаратура на ТЭС размещается в щитах собственных нужд или же в комплексных распределительных устройствах (КРУ), отдельно от электродвигателей, обычно находящихся в тяжелых условиях окружающей производственной среды. Коммутационные устройства для маломощных двигателей и исполнительных механизмов размещаются в силовых шкафах, на специальных сборках внутри щитов управления или

же в индивидуальных защитных металлических корпусах (коробках) на месте расположения двигателей.

К аппаратуре управления относятся: релейная аппаратура цепей управления и защиты; органы управления (ключи, кнопки, тумблеры и т. п.); индикаторы состояния и положения (амперметры, вольтметры, ваттметры, сигнальные лампы и т. п.); аппаратура технологической защиты объектов (первичные измерительные преобразователи температуры, оснащенные контактным устройством, реле расхода, давления и т. п.). Релейная аппаратура цепей управления размещается обычно вместе с силовой коммутационной аппаратурой в силовых или отдельных шкафах.

Органы управления размещаются на панелях пультов или щитов управления (БЩ, ГрЩУ и др.).

Аппаратура технологической защиты располагается непосредственно на объектах управления.

Все агрегаты собственных нужд ТЭС служат объектами двухпозиционного управления, т. е. находятся в двух состояниях: включено или выключено. Управление электроприводом при этом сводится к включению или отключению силового коммутационного аппарата, подводящего питание к электродвигателю от источника переменного или постоянного тока.

Основной канал дистанционного управления соединяет орган управления с силовым коммутационным аппаратом. Канал управления представляет собой многопроводный электрический контрольный кабель, по которому передаются командные сигналы и принимается информация о выполнении команд и состоянии объекта. На основе аппаратуры управления с помощью каналов связи реализуются электрические схемы управления. Они должны составляться исходя из основного требования — надежности, которая складывается из надежности технических средств ДУ и надежности работы оператора. Последняя оценивается количеством ошибочных действий оператора в единицу времени. Следовательно, во избежание ошибок действия оператора по управлению должны быть максимально простыми. Они должны сводиться, например, к одноразовому повороту ключа или нажатию кнопки. В то же время оператор не должен испытывать недостатка в исходной информации. Для этого электрические схемы должны обеспечивать информационную связь с объектом управления в виде визуальных или акустических сигналов, подтверждающих выполнение команд. Кроме того, должна быть обеспечена светозвуковая сигнализация при неисправностях самой электри-

ческой схемы, а также самопроизвольных или преднамеренных включений или отключений того или иного агрегата собственных нужд.

Электрическое питание аппаратуры управления (обмоток реле, катушек электромагнитных пускателей и других элементов коммутационной техники) осуществляется от наиболее надежного источника электропитания на ТЭС переменным или постоянным оперативным током при напряжении 220 В. Вместе с тем электрическое питание силовых и управляющих цепей для крупных электродвигателей собственных нужд ТЭС должно быть независимым друг от друга.

В соответствии с ПТЭ [26] резервирование источников питания цепей управления постоянным током 220 В осуществляется лишь для управления крупными высоковольтными электродвигателями собственных нужд (мельниц, питательных насосов, дымососов и т. п.) и высокоответственными исполнительными механизмами АСУ ТП (например, питания водой, подачи топлива в топку котла и др.). Для остальных исполнительных механизмов АСУ ТП, мощность которых не превышает 4 кВт, питание цепей управления может осуществляться непосредственно от источника силового напряжения двигателей. Однако в этом случае должно обеспечиваться его надежное резервирование.

На ТЭС применяются следующие виды дистанционного управления: прямое индивидуальное, избирательное (по вызову), групповое (управление функциональными группами). Все электрические схемы, реализующие эти способы, должны допускать автоматическое управление.

13.2. ПРЯМОЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

При индивидуальном управлении на каждый исполнительный механизм или электропривод устанавливаются отдельный орган управления (ключ, сдвоенная кнопка) и отдельный указатель положения (индикатор состояния).

Принципиальная электрическая схема прямого управления одним исполнительным механизмом с помощью магнитных реверсивных пускателей (типа МКР или ПМРТ) изображена на рис. 13.1. Исполнительный механизм в цепи дистанционного управления получает питание 380/220 В через автоматический выключатель АВ, располагаемый на силовой сборке вместе с магнитным пускателем и электрическим тормозом.

Регулирующий прибор РП и указатель положений УП питаются от шин управления ШУ, при этом к регулятору питание подводит-

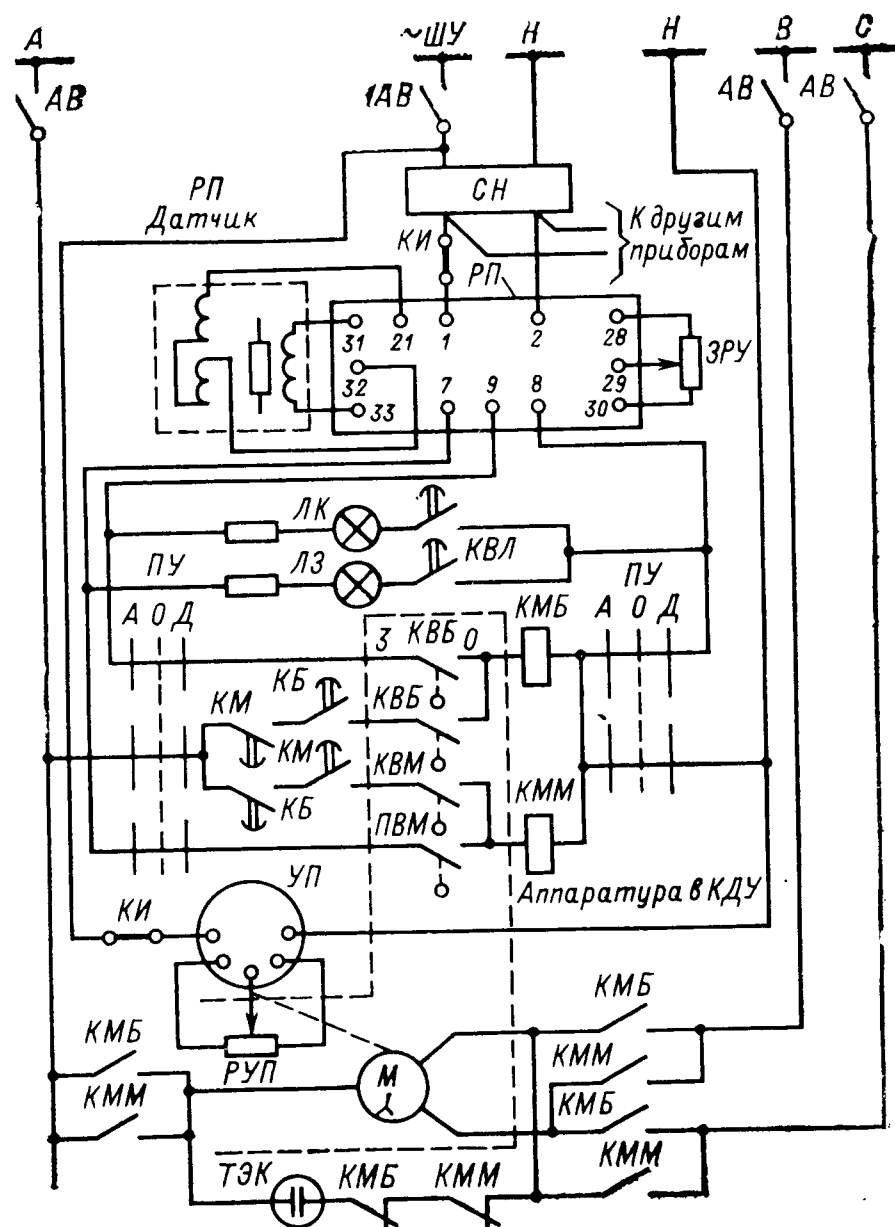


Рис. 13.1. Принципиальная электрическая схема управления исполнительным механизмом с колонкой дистанционного управления

ся от стабилизатора напряжения СН (один СН на три-четыре регулирующих прибора). Независимое питание УП позволяет сохранить контроль за положением выходного вала исполнительного механизма или связанного с ним регулирующего органа при отключении электрического питания исполнительного механизма. Поскольку от шин питания ШУ (АВ) подается питание на группу регуляторов, каждый регулятор и его указатель положения УП могут отсоединяться на время испытания или проверки с помощью специальных зажимов КИ. Когда переключатель управления ПУ находится в положении А (автоматика), то при появлении сигнала на выходе регулятора (на-

пример, больше) напряжение с зажимов 8—9 подводится к катушке ПМБ, срабатывает контактор и замыкает контакты ПМБ, при этом на обмотку статора двигателя поступит трехфазное напряжение источника 380 В в последовательности фаз АВС (если считать слева). Двигатель и выходной вал сервопривода начнут вращаться в сторону «больше». При срабатывании регулятора в сторону «меньше» под напряжением окажется катушка ПММ, замкнутся контакты ПММ и на обмотки статора двигателя поступит напряжение источника в последовательности фаз АСВ. Таким образом, произойдет чередование двух фаз В и С и асинхронный двигатель исполнительного механизма начнет вращаться в противоположном направлении — в сторону «меньше». Перемещение выходного вала сервопривода при дистанционном управлении кнопками КБ и КМ ограничивается концевыми выключателями КВБ—КВМ, при автоматическом управлении — путевыми выключателями ПВБ—ПВМ.

Магнитный пускатель снабжен тормозом электролитическим конденсаторным (ТЭК), который, подключаясь к обмоткам статора двигателя через нормально замкнутые вспомогательные контакты ПМБ и ПММ в момент разрыва силовых контактов, «поглощает» остаточный заряд обмоток статора, способствующий дополнительному вращению (выбегу) ротора, и вызывает его электрическое торможение. Тормозной эффект (см. рис. 6.12) зависит от соотношения емкости конденсатора и мощности двигателя. Для контроля за действием регулятора к зажимам 7—8 и 9—8 подключаются индикаторные лампы ЛК и ЛЗ, расположенные на пульте. Нажимая кнопку контроля включения ламп КВЛ, оператор может проследить за частотой и знаком сигналов, поступающих с выхода регулятора в цепь управления исполнительным механизмом, и проверить наличие «пульсирующего» режима, характеризующего нормальный режим работы регулятора. Вся аппаратура управления, на которую может воздействовать оператор: переключатель управления ПУ, кнопки КМ—КБ, лампы ЛК—ЛЗ, кнопка КВЛ и задатчик регулятора ЗРУ в аппаратуре ГСП — собрана в один блок управления БУ и располагается совместно с указателем положения УП на пульте управления.

Схема управления асинхронным двигателем исполнительного механизма с помощью трехфазного реверсивного тиристорного усилителя аналогична схеме управления с магнитным пускателем (рис. 13.1), вместо которого используется тиристорный усилитель ТУ, а вместо конденсаторного тормоза ТЭК — электромагнитный тормоз. На вход тиристорного усилителя (см. рис. 9.4) при автоматическом управлении поступает управляющий сигнал с напряжением 24 В от регулирующего прибора АСР. В зависимости от знака этого напряжения включаются верхний или нижний блокинг-генератор и правый или левый ключ. Блокинг-ге-

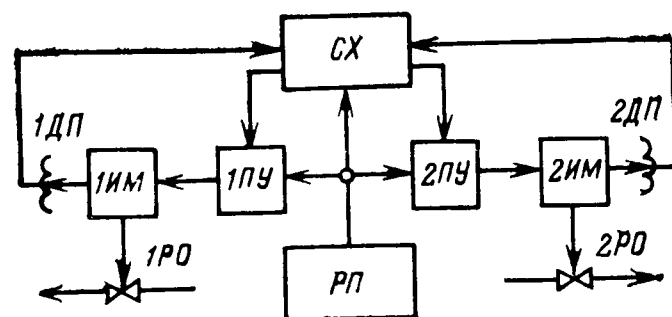


Рис. 13.2. Функциональная схема синхронизации хода двух исполнительных механизмов:

РП — электронный регулирующий прибор; СХ — синхронизатор хода (ПЛК-II); ИМ, 2ИМ — дополнительные механизмы; РО, 2РО — регулирующие органы; ДП, 2ДП — датчики положения

нераторы включают тиристоры. Фаза *С* силового питания непосредственно подводится к двигателю, а фазы *А* и *В* — через ключи. Последовательность подключения фаз к двигателю зависит от того, какие ключи открыты — левые или правые. Таким образом устанавливается соответствие сигнала с выхода регулирующего прибора с направлением вращения двигателя.

Для дистанционного управления двигателем используется напряжение источника 24 В с блока питания (на рис. 9.4 не показан). Ключ источника соединен с зажимом 8, минус — с зажимом 10 и с входом цепей управления ТУ. При переводе переключателя управления в положение «дистанционно» нажатием кнопки *КБ* или *КМ* зажим 10 соединяется с зажимами 9 «больше» или 7 «меньше» ТУ и тем самым имитируется сигнал с выхода РП. В остальной схеме управления с тиристорным усилителем не отличается от схемы и обозначений, приведенных на рис. 13.1.

Система управления двумя исполнительными механизмами (рис. 13.2) предусматривает автоматическое или дистанционное управление двумя исполнительными механизмами, а также дистанционное управление одним исполнительным механизмом и автоматическое — другим.

Согласованное перемещение двух механизмов (ИМ и 2ИМ) осуществляется с помощью логического устройства — переключателя хода (рис. 13.3), действующего в режиме одностороннего ограничения и выполняющего функции синхронизатора хода СХ двух механизмов. Предварительно совмещаются статические характеристики датчиков 1ДП и 2ДП с помощью статических ручек «чувствительность 1» и «чувствительность 2» на переключателе хода. При этом 1ИМ и 2ИМ с помощью кнопок дистанционного управления *КБ* и *КМ* (рис. 13.1)

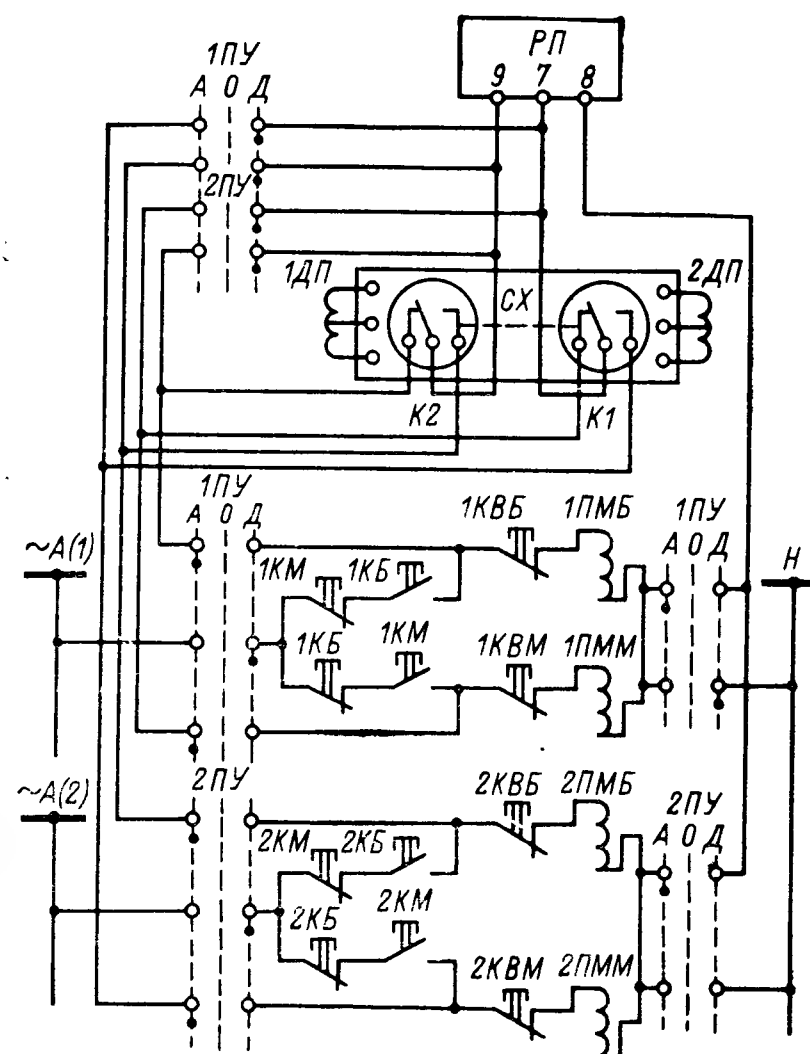


Рис. 13.3. Принципиальная электрическая схема синхронного автоматического управления двумя исполнительными механизмами

устанавливаются в примерно равные положения. Далее на переключателе хода корректором устанавливается исходное положение, при котором левые контактные пары выходного реле СХ (*К1* и *К2* на рис. 13.3) замкнуты, а правые (*К2* и *К3*) разомкнуты. В моменты появления управляющих сигналов с выхода РП вначале включается лишь один ИМ, а далее вследствие появления сигнала небаланса между 1ДП и 2ДП переключается выходное реле СХ (замыкаются его правые контактные пары) и управляющий сигнал вступает на «отставший» ИМ. В результате перемещения отстающего ИМ вслед за ведущим сигнал рассогласования с выхода датчиков в 1ДП и 2ДП исчезнет и выходное реле СХ снова займет исходное положение. Скорость регулирования при шаговой синхронизации уменьшается в 2 раза, поэтому при расчете АСР время сервопривода T_c должно быть увеличено в 2 раза.

Если один исполнительный механизм переводится на дистанционное управление (например, 2ИМ), а второй (1ИМ) остается под воздействием РП, то к его магнитному пускателю подводится сигнал непосредственно с выхода РП в обход СХ через контакты переключателя управления 2ПУ, находящегося в положении «дистанционно».

13.3. ИЗБИРАТЕЛЬНОЕ И ГРУППОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Избирательное дистанционное управление. Сущность избирательного управления (по вызову) состоит в том, что вместо отдельных блоков управления (БУ) и указателей положения УП исполнительных механизмов устанавливается один БУ и один УП на группу регулирующих и запорных органов. При этом каждый орган может быть переведен с помощью общего ключа на автоматическое или дистанционное управление.

Принципиальная электрическая схема управления по вызову приведена на рис. 13.4, где изображены цепи, относящиеся лишь к изб-

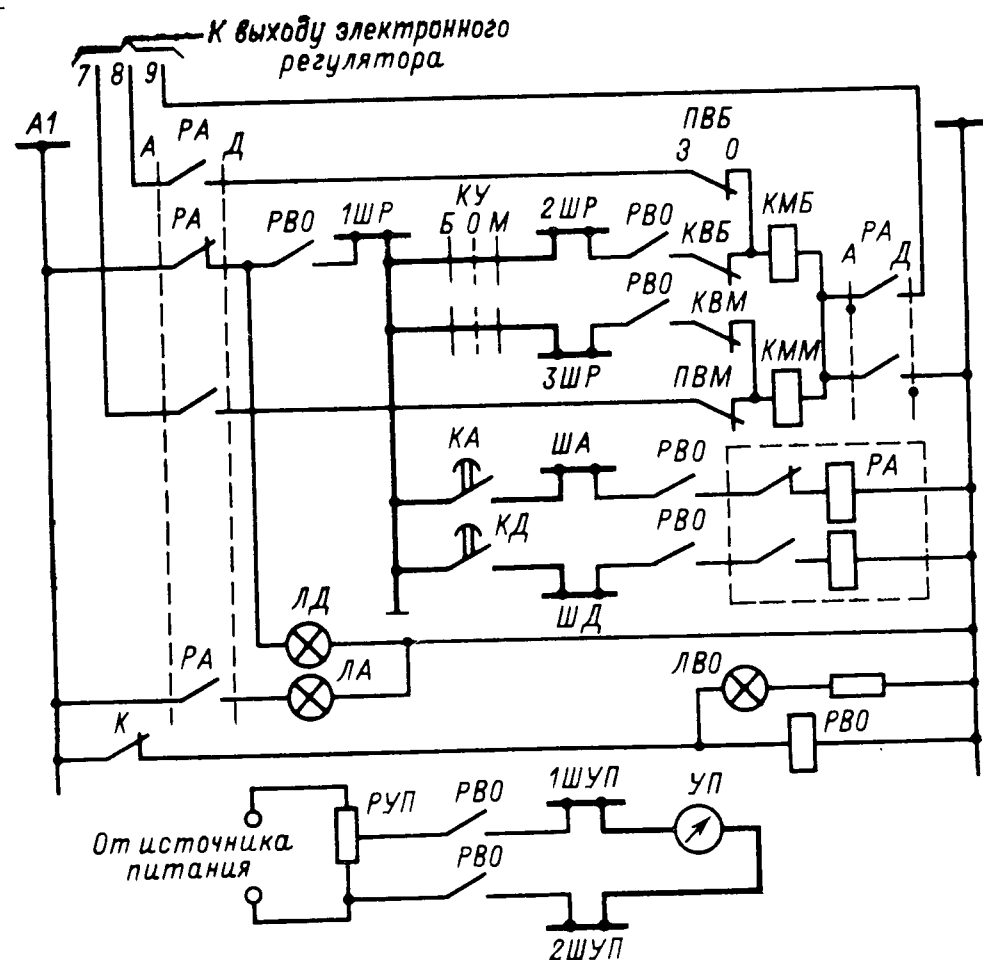


Рис. 13.4. Принципиальная схема управления по вызову

ранному исполнительному механизму. Цепи и аппаратура, обслуживающие всю группу исполнительных механизмов, выделены на этой схеме жирными линиями.

Управление по вызову осуществляется оператором с пульта с помощью маркированных клавиш, которые образуют наборное поле. При нажатии одной из клавиш $nКл$, где n — номер клавиши регулирующего или запорного органа в группе, включается его реле выбора РВО, на мнемосхеме загорается соответствующая лампа ЛВО. Контакты РВО подключают к общим шинкам питания катушки 1ШР—2ШР—3ШР цепи управления вызванного магнитного пускателя ПМБ—ПММ; к шинкам 1ШУП—2ШУП — цепи реостатного датчика указателя положения РУП, а к шинкам ША и ШД — катушки двухпозиционного реле РА, выбранного исполнительного механизма. Контакты РА могут находиться в двух положениях: А — автоматически и Д — дистанционно в зависимости от нажатия соответствующей кнопки КА и КД. С помощью ключа КУ регулирующий орган перемещается в сторону «больше» или «меньше» дистанционно и от зажимов 7—8—9 РП автоматически. При этом по указателю положения УП можно наблюдать за перемещением регулирующего органа. Контрольные лампы ЛА (красная) и ЛД (зеленая) указывают на характер воздействия регулирующего органа — автоматическое или дистанционное.

Существуют схемы парного управления исполнительными механизмами. В них имеются по две системы шинок ШР и ШИП, по два ключа дистанционного управления и два указателя положения. С помощью системы парного вызова оператор имеет возможность управлять и следить за положением двух регулирующих органов одновременно. С помощью системы избирательного управления можно управлять также задвижками с установленным на них электроприводом, в состав которого входят трехфазный асинхронный двигатель и редуктор, понижающий число его оборотов. Различие в схемах управления исполнительным механизмом и электроприводом задвижки существует лишь для мощных двигателей. В этом случае возникает необходимость двухступенчатого усиления управления управляющего сигнала с выхода РП или с ключа дистанционного управления, так как магнитные пускатели исполнительных механизмов рассчитаны на управление двигателем мощностью не выше 1 кВт (рис. 13.5). В качестве первой ступени усиления используется пускатель типа МКР-0 или ПМРТ-69, выходные контакты которого 1РПМ и 2РПМ коммутируют цепи управления катушек ПМБ и ПММ более мощного реверсивного магнитного пускателя, включающего и отключающего электродвигатель задвижки.

счет изменения насыщения силового элемента систем АРПП и АРСП — дросселя насыщения, к выходу которого через трехфазное выпрямительное устройство *В* (на рис. 13.6 через однофазное) подключены электродвигатели питателей.

На одном котле в зависимости от количества питателей может быть установлено несколько дроссельных преобразователей. При этом от одного ПД осуществляется питание группы электродвигателей пыли и одного питателя сырого угля. Согласование дискретного (прерывистого) управляющего сигнала (от автоматического регулирующего прибора РП или кнопок дистанционного управления КМ и КБ) с параметрами электрического сигнала, поступающего на обмотку управления дросселя насыщения, достигается применением промежуточных магнитных усилителей ПМУ и электродвигателя Д1, используемого в качестве интегрирующего звена на выходе регулирующего прибора.

Система автоматического бесконтактного и бесступенчатого регулирования частоты вращения АРПП и АРСП действует следующим образом. Дискретный управляющий сигнал «больше» или «меньше» с выхода регулирующего прибора или непосредственно от ключа дистанционного управления (КБ и КМ) поступает в управляющие обмотки магнитных усилителей 1МУ или 2МУ, расположенных в БРИ-24 (блок регулирования интегрирующий). Выходные обмотки 1МУ и 2МУ соединены по мостовой схеме. Переменное питающее напряжение 127 В подводится к одной из диагоналей этого моста, а ко второй диагонали (выход) подключена обмотка управления ОУ электродвигателя Д1, расположенного в блоке БРИ-23. Обмотка возбуждения ОВ двигателя питается через фазосдвигающий конденсатор С от общего с 1МУ и 2МУ источника питания напряжением 127 В. При подаче в обмотки управления 1МУ и 2МУ управляющих сигналов нарушается равновесие моста, образованного их выходными обмотками, и на ОУ двигателя Д1 поступает напряжение, фаза которого, а тем самым направление вращения Д1 зависят от того, в какой из магнитных усилителей, 1МУ или 2МУ, подан управляющий сигнал. Вал двигателя Д1 через редуктор связан с ротором сельсинного датчика ДС, также расположенного в БРИ-23. Сельсин ДС действует в режиме поворотного трансформатора. Угол поворота сельсина ограничен 45°. Положению 0° соответствует минимальная частота вращения двигателей питателей топлива (300 об/мин), положению 45° — максимальная (1500 об/мин). В БРИ-23 размещается также индукционный датчик перемещения ДП, плунжер которого связан с ротором сельсина. Сигнал $U_{\text{вых}}$ с выхода ДП используется как индикатор положения системы регулирования подачи топлива.

Время полного хода выходного вала сельсина может регулироваться вручную в пределах 15—60 с с помощью переменного сопротивления, расположенного в БРИ-24 (на схеме не показан). К stato-

ру сельсина подводится переменное напряжение 110 В, а ротор нагружен резисторами R_1 и R_2 , выпрямленное напряжение с выхода которых поступает на обмотку управления промежуточного магнитного усилителя ПМУ. Последний суммирует и усиливает поступающие в него сигналы и через потенциометр СР дает ток в управляющие обмотки дросселя насыщения ДН. Дроссель насыщения служит силовым регулирующим элементом. Питание дросселя производится от трехфазной сети через трансформатор T_p . Выпрямленное напряжение от выпрямителей *В* подается на зажимы якорей электродвигателей питателей топлива ЭД, подключенных к преобразователю ПД. Изменение напряжения на выход ПД достигается путем изменения реактивного сопротивления нагрузочных обмоток дросселя ДН и регулированием тока в его управляющих обмотках. Ручное групповое управление частотой вращения двигателей, подсоединенных к одному ПД, осуществляется потенциометром СР, индивидуальное — шунтовыми реостатами ШР.

В качестве привода используется шунтовый двигатель постоянного тока. Последовательно с его обмоткой возбуждения включаются регулировочный реостат и реостат ручного управления. Изменение сопротивлений реостатов в конечном итоге приводит к изменению частоты вращения двигателя. При полностью введенном сопротивлении реостатов двигатель вращается с максимальной частотой, при выведенном — с минимальной.

13.4. СИСТЕМЫ ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Логические элементы. Управляющие и исполнительные элементы логических систем имеют только два состояния: включено — выключено, открыто — закрыто, замкнуто — разомкнуто и т. п. Элемент, реализующий такое состояние, называется логическим. Устройство логического управления (УЛУ) в целом, характеризующееся бинарным состоянием, реализует двоичную функцию некоторого числа двоичных аргументов. Математические операции с двоичными аргументами исследуются с помощью аппарата алгебры логики или булевой алгебры, названной по имени английского математика Д. Буля.

Рассмотрим типовые операции, логические функции и логические элементы, наиболее употребительные в автоматических системах дискретного (прерывистого) действия.

Инверсия. Ложный сигнал (сообщение) является противоположным по смыслу истинному, т. е. служит его отрицанием. Обозначив истинную форму через 1, а ложную

счет изменения насыщения силового элемента систем АРПП и АРСР — дросселя насыщения, к выходу которого через трехфазное выпрямительное устройство *В* (на рис. 13.6 через однофазное) подключены электродвигатели питателей.

На одном котле в зависимости от количества питателей может быть установлено несколько дроссельных преобразователей. При этом от одного ПД осуществляется питание группы электродвигателей пыли и одного питателя сырого угля. Согласование дискретного (прерывистого) управляющего сигнала (от автоматического регулирующего прибора РП или кнопок дистанционного управления КМ и КБ) с параметрами электрического сигнала, поступающего на обмотку управления дросселя насыщения, достигается применением промежуточных магнитных усилителей ПМУ и электродвигателя Д1, используемого в качестве интегрирующего звена на выходе регулирующего прибора.

Система автоматического бесконтактного и бесступенчатого регулирования частоты вращения АРПП и АРСР действует следующим образом. Дискретный управляющий сигнал «больше» или «меньше» с выхода регулирующего прибора или непосредственно от ключа дистанционного управления (КБ и КМ) поступает в управляющие обмотки магнитных усилителей 1МУ или 2МУ, расположенных в БРИ-24 (блок регулирования интегрирующий). Выходные обмотки 1МУ и 2МУ соединены по мостовой схеме. Переменное питающее напряжение 127 В подводится к одной из диагоналей этого моста, а ко второй диагонали (выход) подключена обмотка управления ОУ электродвигателя Д1, расположенного в блоке БРИ-23. Обмотка возбуждения ОВ двигателя питается через фазосдвигающий конденсатор С от общего с 1МУ и 2МУ источника питания напряжением 127 В. При подаче в обмотки управления 1МУ и 2МУ управляющих сигналов нарушается равновесие моста, образованного их выходными обмотками, и на ОУ двигателя Д1 поступает напряжение, фаза которого, а тем самым направление вращения Д1 зависят от того, в какой из магнитных усилителей, 1МУ или 2МУ, подан управляющий сигнал. Вал двигателя Д1 через редуктор связан с ротором сельсинного датчика ДС, также расположенного в БРИ-23. Сельсин ДС действует в режиме поворотного трансформатора. Угол поворота сельсина ограничен 45°. Положению 0° соответствует минимальная частота вращения двигателей питателей топлива (300 об/мин), положению 45° — максимальная (1500 об/мин). В БРИ-23 размещается также индукционный датчик перемещения ДП, плунжер которого связан с ротором сельсина. Сигнал $U_{\text{вых}}$ с выхода ДП используется как индикатор положения системы регулирования подачи топлива.

Время полного хода выходного вала сельсина может регулироваться вручную в пределах 15—60 с с помощью переменного сопротивления, расположенного в БРИ-24 (на схеме не показан). К стато-

ру сельсина подводится переменное напряжение 110 В, а ротор нагружен резисторами R_1 и R_2 , выпрямленное напряжение с выхода которых поступает на обмотку управления промежуточного магнитного усилителя ПМУ. Последний суммирует и усиливает поступающие в него сигналы и через потенциометр СР дает ток в управляющие обмотки дросселя насыщения ДН. Дроссель насыщения служит силовым регулирующим элементом. Питание дросселя производится от трехфазной сети через трансформатор Тр. Выпрямленное напряжение от выпрямителей В подается на зажимы якорей электродвигателей питателей топлива ЭД, подключенных к преобразователю ПД. Изменение напряжения на выход ПД достигается путем изменения реактивного сопротивления нагрузочных обмоток дросселя ДН и регулированием тока в его управляющих обмотках. Ручное групповое управление частотой вращения двигателей, подсоединенных к одному ПД, осуществляется потенциометром СР, индивидуальное — шунтовыми реостатами ШР.

В качестве привода используется шунтовый двигатель постоянного тока. Последовательно с его обмоткой возбуждения включаются регулировочный реостат и реостат ручного управления. Изменение сопротивлений реостатов в конечном итоге приводит к изменению частоты вращения двигателя. При полностью введенном сопротивлении реостатов двигатель вращается с максимальной частотой, при выведенном — с минимальной.

13.4. СИСТЕМЫ ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Логические элементы. Управляющие и исполнительные элементы логических систем имеют только два состояния: включено — выключено, открыто — закрыто, замкнуто — разомкнуто и т. п. Элемент, реализующий такое состояние, называется логическим. Устройство логического управления (УЛУ) в целом, характеризующееся бинарным состоянием, реализует двоичную функцию некоторого числа двоичных аргументов. Математические операции с двоичными аргументами исследуются с помощью аппарата алгебры логики или булевой алгебры, названной по имени английского математика Д. Буля.

Рассмотрим типовые операции, логические функции и логические элементы, наиболее употребительные в автоматических системах дискретного (прерывистого) действия.

Инверсия. Ложный сигнал (сообщение) является противоположным по смыслу истинному, т. е. служит его отрицанием. Обозначив истинную форму через 1, а ложную

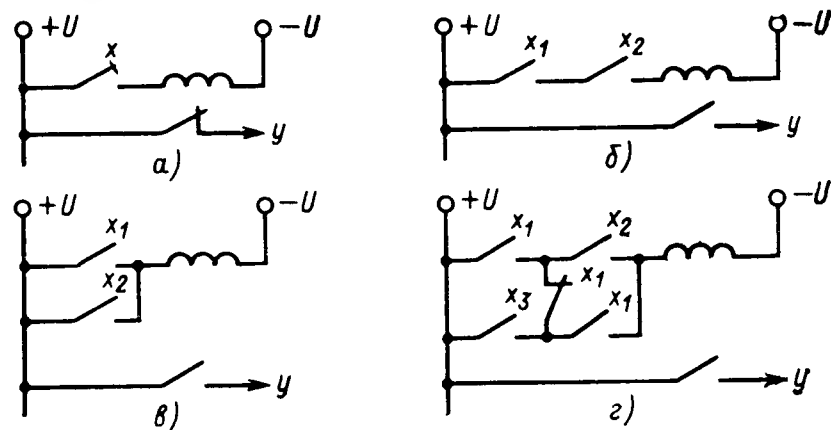


Рис. 13.7. Релейные эквиваленты:

а — операции НЕ; б — функции И для двух сигналов; в — функции ИЛИ; г — функции «два из трех»

через 0, можно записать логическую операцию отрицания (инверсии) НЕ:

$$\left. \begin{array}{cc} y = \bar{x} \\ x & y = \bar{x} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{array} \right\} \quad (13.1)$$

Реализация этой операции логическим элементом НЕ будет означать: при наличии сигнала на входе сигнал на выходе отсутствует или сигнал на выходе появится только при исчезновении сигнала на входе. Релейный эквивалент операции НЕ изображен на рис. 13.7, а.

Конъюнкция (функция И). Сложное сообщение истинно только тогда, когда истинны все отдельные сообщения, его составляющие. Сигнал на выходе элемента, реализующего функцию И, появится только тогда, когда имеется сигнал на всех его входах.

Например, для случая аргументов x_1 и x_2 , если истинное сообщение обозначить через 1, а ложное через 0, сложную логическую функцию И можно записать:

$$\left. \begin{array}{ccc} x_1 & x_2 & y = x_1 \cap x_2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{array} \right\} \quad (13.2)$$

По аналогии с алгебраическим умножением конъюнкцию называют *логическим умножением*: функция (13.3) чи-

тается: x_1 И x_2 . Релейный эквивалент функции И для двух сигналов на входе показан на рис. 13.7, б.

Дизъюнкция (функция ИЛИ). Сложное сообщение истинно, когда истинно хотя бы одно из сообщений, его составляющих. Сигнал на выходе логического элемента, реализующего функцию ИЛИ, появится только тогда, когда имеется сигнал хотя бы на одном из его входов. В случае двух аргументов эту функцию можно записать:

$$\left. \begin{array}{ccc} x_1 & x_2 & y = x \cup x_2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{array} \right\} \quad (13.3)$$

Дизъюнкция называется *логическим сложением* и читается: x_1 ИЛИ x_2 . Релейный эквивалент функции ИЛИ для двух аргументов показан на рис. 13.7, в.

Существуют и другие более сложные логические функции, но все они могут быть реализованы с помощью унифицированных логических элементов И, ИЛИ и НЕ.

Устройства логического управления (УЛУ). На основе вышеописанных логических функций и элементов строятся логические схемы действия промышленных систем логического управления, воздействующих на объекты ТЭС. При этом необходимая последовательность операций по отключению (включению) объектов управления логических систем достигается путем использования рассмотренных логических функций или их сочетаний. Сопряжение УЛУ с регулирующими (запорными) органами и пусковыми устройствами электроприводов собственных нужд ТЭС осуществляется посредством промежуточных реле (РП), играющих роль усилителей мощности. При этом выходной сигнал РП (y) заводится в цепь управления силового коммутационного устройства электропривода того или иного агрегата собственных нужд или исполнительного механизма, сочлененного с регулирующим (запорным) органом.

В автоматизированном управлении ТЭС логические системы управления находят наибольшее применение при пуске (останове) оборудования, переключениях в тепловой схеме энергоблоков и изменениях в режимах работы, требующих множества разовых операций, совершаемых в определенной последовательности или одновременно.

Удобнее всего УЛУ реализовать на энергоблоках и ТЭС, основное и вспомогательное оборудование которых

разделено на функциональные группы (подгруппы) по технологическим признакам [13].

Чаще всего с помощью УЛУ осуществляется автоматический пуск или останов какого-либо отдельного агрегата (установки) из состава энергоблока на основе принятой последовательности элементарных операций (шагов). Исполнение каждого шага контролируется, после чего принимается решение и совершается очередной шаг.

Процесс принятия решения автоматическим логическим устройством или человеком-оператором складывается из информационной подготовки и собственно принятия решения. Процедура принятия простых решений может быть описана с помощью алгоритмов, под которыми понимают совокупность элементарных актов переработки информации. Сложные решения описываются с помощью совокупностей простых. В качестве элементарных актов (действий) применяют оперативные единицы как нечто цельное, используемое человеком в работе по контролю и управлению. Оперативными единицами могут быть простые действия, имеющие законченность в работе оператора. Например, поиск того или иного индикатора на приборной панели, считывание показаний с прибора, выполнение простых вычислительных операций, включение тумблеров, нажатие кнопок и т. п. Оперативные единицы могут быть двух видов: «логические условия» (типа «да», «не», «и», «или» и др.) и «операторы» (элементарные законченные действия по управлению и контролю).

Следует отличать элементарные законченные действия по управлению от одиночных операций по управлению, влияющих на технологический процесс. Например, одиночная операция пуска резервного питательного насоса, осуществляемая дистанционно, состоит из нескольких подготовительных и одной завершающей операции.

Наиболее наглядной формой записи работы персонала или автоматического устройства в алгоритмическом виде служит ее представление в виде блок-схемы. «Операторы» в такой схеме обозначаются прямоугольниками, «логические условия» — ромбами. Внутри каждого прямоугольника или ромба кратко записываются смысл данного действия или условия. «Операторы» и «логические условия» располагаются в той последовательности, в которой они выполняются в реальном процессе управления, и соединяются между собой стрелками, указывающими направление перехода от одного действия к другому. Если проверяемое «логическое условие» выполняется, то управление (информа-

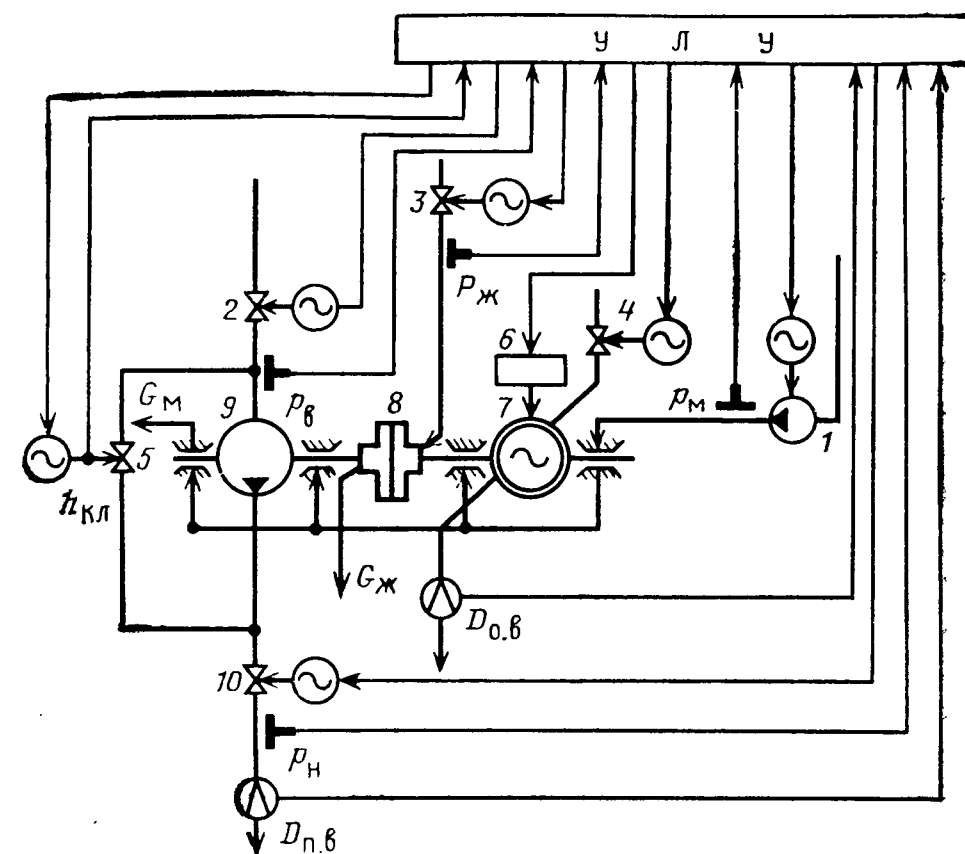


Рис. 13.8. Технологическая схема пуска питательного электронасоса

ция) передается по стрелке с индексом 1, если нет — с индексом 0. Изменение режимов работы оборудования учитывается тем, что для каждого режима структура алгоритма, характеристики оперативных единиц (словесный или формальный состав) и их число будут различными.

Рассмотрим управление пуском в функциональной подгруппе (ФПГ) питательного электронасоса (ПЭН). Операции пуска осуществляются в следующем порядке (рис. 13.8): 1) включение маслоснабжения 1 системы смазки подшипников; 2) открытие задвижки 2 на всасе ПЭН9 (подача воды в насос); 3) открытие задвижки 3 (подача рабочей жидкости в гидромурфту 8; 4) открытие задвижки 4 (подача охлаждающей воды в статор электропривода ПЭН); 5) открытие вентили разгрузки 5 (обеспечение нагрузки холостого хода ПЭН); 6) включение пускового устройства 6 электропривода 7; 7) открытие запорной задвижки 10 с напорной стороны ПЭН (подача питательной воды в котел); 8) закрытие вентили разгрузки 5.

На этом процесс пуска заканчивается. Дальнейшее управление подачей воды в котел осуществляется всережимной АСР питания. Последняя вследствие отсутствия сигнала задания по нагрузке в начале пуска устанавливает регулирующий орган в положение $x_p = x_p^{\min}$.

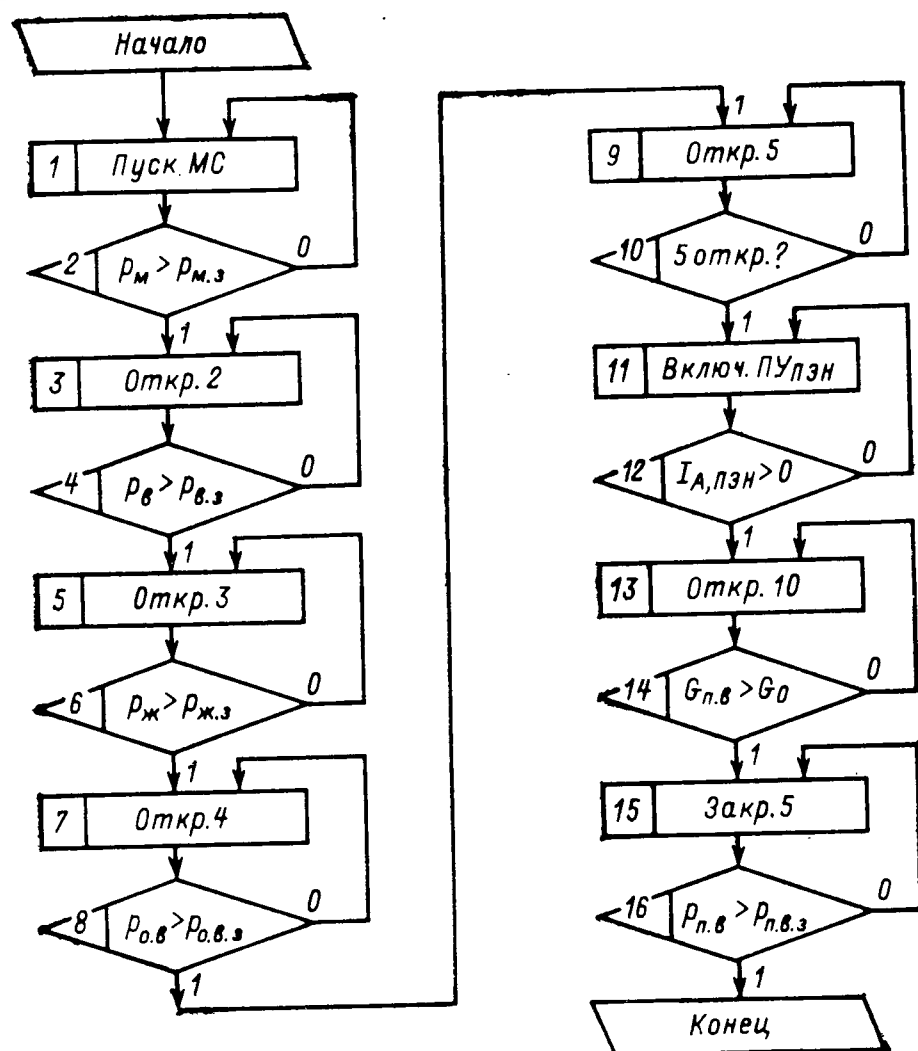


Рис. 13.9. Блок-схема алгоритма пуска ПЭН:

начало (визуальный осмотр ПЭН, подключение источников электрического питания); 1 — операция включения маслонасоса 1; 2 — логическое условие проверки операции 1; 3 — операция открытия задвижки 2; 4 — логическое условие проверки выполнения операции 3; 5 — операция открытия задвижки 3; 6 — логическое условие проверки выполнения операции 5; 7 — операция открытия задвижки 4; 8 — логическое условие проверки выполнения операции 8; 9 — операция открытия вентиля 5; 10 — логическое условие проверки выполнения операции 9; 11 — операция включения пускового устройства 6; 12 — логическое условие проверки выполнения операции 11; 13 — операция открытия задвижки 10; 14 — логическое условие проверки выполнения операции 13; 15 — операция закрытия вентиля 5; 16 — логическое условие проверки выполнения операции 15; окончание (визуальный осмотр ПЭН)

Затем по мере роста нагрузки регулятор перемещает регулирующий орган в соответствии с заданным законом (П, ПИ и др.) в существующем диапазоне регулирования.

Контроль за выполнением отдельных операций пуска осуществляется визуально местными приборами: манометром, расходомером и др. или же автоматически путем определенной последовательности замыкания (размыкания) контактов или их логических эквивалентов

(0 и 1) в бесконтактных схемах электрической сигнализации и управления электродвигателями. Блок-схема алгоритма пуска ПЭН, указывающего последовательность переключений в пределах рассмотренной ФПГ, показана на рис. 13.9.

Переход на логическое управление связан с некоторым увеличением измерительной аппаратуры (датчиков состояния оборудования) и усложнением электрических схем управления, но оправдывается повышением надежности системы управления в целом и существенным облегчением труда оперативного персонала, в особенности в пусковых и переменных режимах работы энергооборудования.

Контрольные вопросы

1. Назовите способы дистанционного управления.
2. Поясните принцип действия системы прямого дистанционного управления, пользуясь рис. 13.1.
3. В чем состоит сущность дистанционного управления по вызову?
4. Назовите типовые логические элементы.
5. Какие алгебраические операции воспроизводятся с помощью типовых логических элементов? Приведите пример.
6. Поясните принцип действия УЛУ пуском ПЭН, пользуясь рис. 13.8 и 13.9.

Глава четырнадцатая

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ТЕПЛОВЫЕ ЗАЩИТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СИГНАЛИЗАЦИЯ

14.1. НАЗНАЧЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ ЗАЩИТ

Устройства защиты обычно устанавливаются для контроля наиболее ответственных параметров, чрезмерное отклонение которых от заданных значений ведет к нарушению нормального технологического процесса и повреждению оборудования. Автоматические защитные устройства, обслуживающие тепловую часть электрической станции, называются тепловыми защитами. Наличие действующих тепловых защит служит существенным фактором повышения надежности паровых котлов, турбин и вспомогательного оборудования и служит дополнительным источником повышения производительности труда в технологических цехах ТЭС за счет расширения зоны обслуживания.

Большинство современных защитных устройств представляют собой системы непрямого действия, включающие отдельные, связанные между собой элементы: первичные приборы — датчики, снабженные электрическими контактами, усилительные устройства, промежуточные реле, устройства пуска и останова исполнительных механизмов. Чаще всего действие тепловой защиты увязывается с работой логических систем управления, которые, как известно, позволяют включать и отключать электрические пусковые устройства вспомогательных механизмов в определенной последовательности — «по цепочке». Например, аварийный останов дымососов парового котла приводит через устройства электрической блокировки к останову дутьевых вентиляторов и топливоподающих устройств.

По степени воздействия на защищаемые установки защитные устройства разделяются на *основные (главные)* и *местные (локальные)*. К основным относятся защитные устройства, срабатывание которых приводит к останову парового котла или энергетического блока в целом или к глубокому снижению их нагрузки. Местные, или локальные, защиты предотвращают развитие аварии без останова основных агрегатов. Так как подмена действия защитных устройств в аварийных ситуациях невозможна, они должны быть более надежными, чем непрерывно действующие системы контроля и регулирования. Поэтому логические схемы защит, определяющие последовательность срабатывания пусковых или отключающих устройств, составляются так, чтобы вероятность их ложного действия или отказа была близка к нулю.

Рассмотрим несколько примеров.

1. Простейший случай — *один из одного* (см. рис. 13.7, б). При использовании одного датчика его отказ определяет отказ системы в целом, а каждое ложное срабатывание контактного устройства сопровождается ложным действием защиты всего устройства. Поэтому системы ТЗ с одним датчиком предусматриваются только для защит, в которых используются специальные высоконадежные приборы. Один датчик устанавливается также в некоторых особо ответственных системах, когда отказ в срабатывании защитного устройства приводит к тяжелому повреждению оборудования, а убытки от аварии значительно превышают ущерб от простоя, связанного с ложным действием ТЗ, например, в системе защиты от осевого сдвига ротора паровой турбины. Кроме того, один датчик устанавливается в защитных устройствах локального назначения, направленных на предотвращение аварии, ложное срабатывание которых не влечет за собой останова

оборудования или снижения его нагрузки. Например, включение резервных механизмов в параллель с работающими, подсветка факела в топке котла путем включения дополнительных горелок, работающих на легко воспламеняющихся топливах, и т. п.

2. *Два датчика с одинаковыми уставками*, контакты которых включаются в параллель друг с другом в соответствии с логической функцией ИЛИ (один из двух) (см. рис. 13.7, г); применяются в тех случаях, когда тепловое оборудование требует повышенной надежности действия защиты или отсутствия отказов в ее работе. При этом ложные срабатывания ТЗ либо маловероятны, либо не ведут к тяжелым последствиям, например в защитных устройствах, воздействующих на открытие клапанов при повышении давления пара на выходе котла или других объектов, работающих под давлением.

3. *Два датчика с одинаковыми уставками*, контакты которых соединяются по схеме И (два из двух, см. рис. 13.7, в). Применяются в системах защит для уменьшения вероятности их ложного срабатывания. Например, в случаях, когда защита воздействует на снижение нагрузки или приводит к останову основного оборудования, а ее датчики не обладают достаточной надежностью.

4. *Два датчика с разными уставками*. Оба контактных устройства включаются последовательно по схеме И (см. рис. 13.7, в). Применяются в двухступенчатых системах ТЗ. При этом контактное устройство первого прибора настраивается на срабатывание при достижении параметров первой аварийной уставки, при которой осуществляются локальные операции, а контактное устройство второго прибора настраивается на вторую аварийную уставку, превышающую первую. Тогда защита на останов будет срабатывать только при замыкании обоих контактов. Например, защиты от повышения уровня в регенеративных подогревателях от погасания факела в топке (первая ступень — потускнение и подхват факела газомазутными горелками, вторая — останов котла).

5. *Три датчика с одинаковыми уставками*, контакты которых соединяются последовательно — параллельно и реализуют логическую функцию «два из трех» (см. рис. 13.7, г). Система в целом позволяет повысить надежность действия защит по сравнению с вариантами, реализующими функции И и ИЛИ, однако требует большего количества приборов, увеличивает объем профилактических и ремонтно-восстановительных работ.

Дополнительным мероприятием, повышающим надежность действия защитных устройств, служит использование высоконадежных источников электрического питания цепей управления. Таким источником на ТЭС служит аккумуляторная батарея с напряжением на выходе 220 В, которая продолжает снабжать цепи защиты электрическим питанием при авариях, сопровождаемых полной потерей напря-

жения переменного тока в системе собственных нужд. Кроме того, питающее напряжение подводится к панелям защиты по двум независимым линиям, одна из которых является резервной. При этом сигнал об отключении напряжения питания на каждую из групп защит автоматически передается оператору на щит управления с помощью сигнальных устройств (световые табло, звуковой сигнал). Другими необходимыми мероприятиями, повышающими надежность защит в условиях эксплуатации служат также систематический контроль срабатывания и профилактические ремонты.

Мерой надежности ТЗ служит среднее время наработки на один отказ или среднее время работы между двумя отказами

$$\bar{t}_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n},$$

где t_i — время наработки на один отказ; n — число отказов. В соответствии с ГОСТ 17605-72 этот показатель при проектировании систем защит должен приниматься не ниже 200 тыс. ч. В то же время по опытным данным для реальных защит $\bar{t}_{\text{ср}}$ пока не превышает 5—10 тыс. ч [19].

14.2. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ЗАЩИТЫ БАРАБАННЫХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

Защита от повышения давления пара. Каждый паровой котел на случай повышения давления пара сверх допустимого снабжается предохранительными клапанами, действующими по принципу регуляторов давления «до себя». Клапаны устанавливаются на выходном коллекторе пароперегревателя и барабане. Суммарная пропускная способность этих клапанов выбирается с некоторым запасом по отношению к максимальной производительности парового котла на случай отказа части клапанов. При этом клапаны, установленные на выходном коллекторе, должны открываться раньше барабанных и при меньшем по абсолютному значению давлении пара на 0,2—0,3 МПа, с тем чтобы обеспечить охлаждение змеевиков пароперегревателя паром при наличии факела в топке.

На современных паровых котлах и паровых коллекторах в комплекте предохранительных клапанов используются специальные импульсные предохранительные устройства

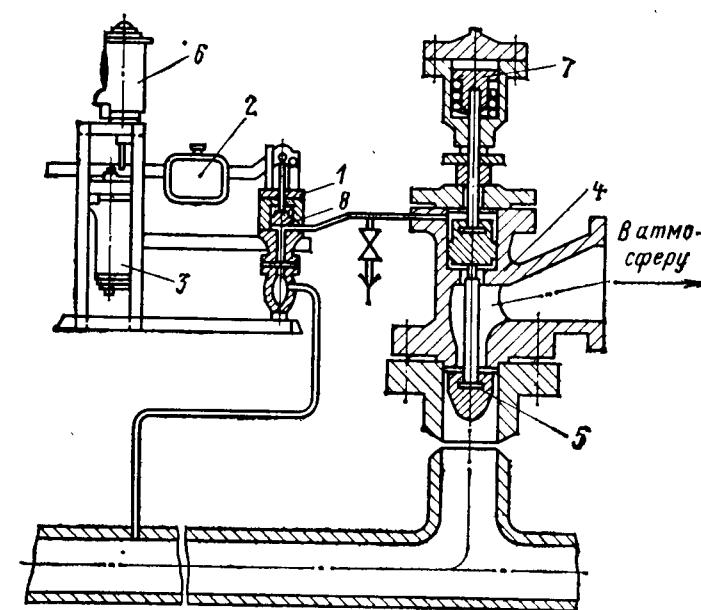


Рис. 14.1. Схема импульсного предохранительного устройства

(ИПУ). Принципиальная схема действия предохранительного клапана с ИПУ приведена на рис. 14.1.

При нормальном давлении пара импульсный клапан 1 закрыт под давлением груза 2; главный клапан 5 плотно закрыт, так как находится под давлением пара. При повышении давления в коллекторе сверх допустимого сначала открывается импульсный клапан за счет того, что усилие, развиваемое паром на запорную тарелку 8, превышает усилие, действующее на нее со стороны груза 2. Кроме того, импульсный клапан может быть открыт под действием усилия электромагнита открытия 6, который в свою очередь действует по сигналу от контрольного контактного манометра. При открытии импульсного клапана давление пара над поршнем 4 возрастает от давления в коллекторе, поршень начнет смещаться вниз и открывать главный клапан 5. Это вызовет пропуск избыточного пара в атмосферу и восстановление давления пара в коллекторе до значения, при котором импульсный клапан 1 вновь закроется под действием груза 2 или электромагнита закрытия 3. Прекращение доступа пара со стороны импульсного клапана в надпоршневое пространство главного клапана 5 вызовет его «посадку», т. е. закрытие под действием давления в коллекторе. Смягчение удара клапана о седло при посадке происходит за счет паровой подушки в надпоршневом пространстве сервопривода 4 и специального демпферного устройства 7, снабженного пружиной и заполняемого водой от постоянного источника.

Защита по уровню в барабане. Упуск уровня и перепитка барабана относятся к самым тяжелым авариям на ТЭС (см. § 11.6). Каждый паровой котел оснащается си-

циркуляции, требуют установки ряда дополнительных защит, воздействующих на его останов при возникновении аварийных ситуаций.

Защита от прекращения подачи воды в паровой котел. Для каждого контура прямоточного котла предусматривается автоматическая защита, воздействующая на останов агрегата при снижении расхода воды $\downarrow D_{п.в}$ на контур по 30 % расчетной производительности. Сигналом, подтверждающим необходимость срабатывания защиты, может служить снижение давления за регулирующим питательным клапаном (РКП) до 15 % по сравнению с давлением при полном расходе. Одновременное появление этих сигналов вызывает включение резервных питательных насосов, а в случае их отказа через 20 с защита производит останов парового котла воздействием на отключение дутьевых вентиляторов.

Защита от разрыва труб экономайзера. Утечка воды в экономайзере из-за появления «свищей», чаще всего возникающих в местах сварки трубок, помимо значительных потерь питательной воды, может привести к нарушению нормального режима работы испарительного контура и повышению температуры пара по тракту. Поэтому появление небаланса ΔD_1 до 25—30 % между расходами воды до и после экономайзера (Э) на каждом из его потоков служит сигналом для срабатывания защиты, воздействующей на останов парового котла с выдержкой времени 20 с, необходимой для предотвращения ложного останова из-за небаланса расходов по режимным условиям. Иногда в качестве подтверждающего сигнала этой защиты используется резкое повышение температуры пара по тракту (например, за

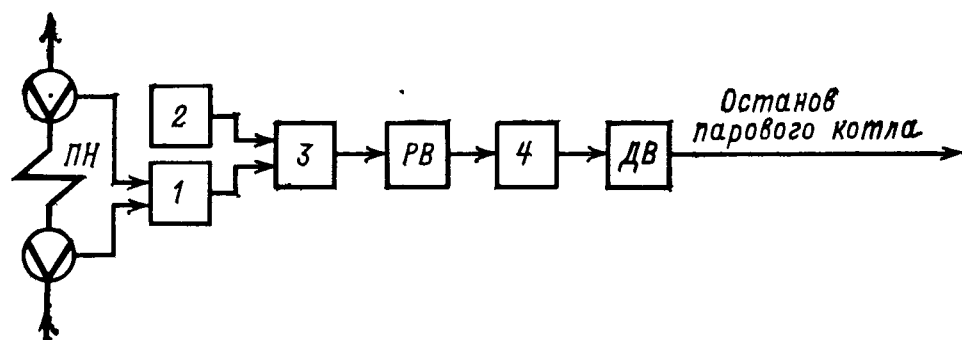


Рис. 14.4. Схема защиты прямоточного парогенератора от разрыва труб пароводяного тракта:

1 — сигнализатор небаланса расхода; 2 — датчик подтверждающего сигнала; 3 — первичное реле; 4 — переключатель блокировки; РВ — реле времени; ДВ — отключающее устройство дутьевого вентилятора; ПН — поверхность нагрева

ВРЧ). Аналогично устроены и срабатывают защиты от повреждения других поверхностей нагрева (рис. 14.4).

Защита от повышения (понижения) давления пара перед встроенной задвижкой. Защитами этого вида необходимо оснащать паровые котлы со сверхкритическим давлением пара. При повышении $\uparrow p$ или понижении $\downarrow p$ давления пара перед встроенной задвижкой против номинального значения, устанавливаемого заводом, замыкаются контакты контрольных манометров, включенных в цепь защиты по схеме «два из двух». Это приводит к срабатыванию промежуточного реле и далее по цепочке электроблокировки к отклонению дутьевых вентиляторов и топливоподающих устройств.

Логическая схема защит прямоточного парового котла. На рис. 14.5 изображена логическая схема действия автоматических защит прямоточного парового котла, работающего на газовом или жидком (мазуте) топливе. Использование газомазутного топлива требует применения защит, действующих на останов котла в случае понижения давления топлива (газа или мазута) перед горелками. Символ И, так же как и на схеме на рис. 14.3, означает одновременность действия, ИЛИ в рассматриваемой схеме — независимость действия, а Δt — задержку действия защиты во времени. Отключение дутьевых вентиляторов или дымососов прямоточного котла также приводит к его останову (по каналам электроблокировки), а превышение давления пара в выходном коллекторе — к срабатыванию импульсного предохранительного устройства ИПУ и сбросу излишнего пара в атмосферу (см. рис. 14.1).

Кроме того, прямоточный котел, так же как и барабанный, снабжается системами защит от повышения и понижения температуры первичного пара (на схеме не показаны), действующими на останов дутьевых вентиляторов ДВ и прекращение подачи топлива.

При повышении температуры вторичного пара до первой уставки $\uparrow t_I$ открывается запорная задвижка на линии аварийного впрыска и включается в работу регулятор аварийного впрыска (регулятор $t_{в.п}$). Превышением температурой вторичного пара второй уставки $\uparrow t_{II}$, так же как и понижение ее до первой уставки $\downarrow t_I$, должно приводить к останову парового котла.

Паровые котлы, имеющие регенеративные воздухоподогреватели, оснащаются дополнительной защитой, воздействующей на останов котла при отключении всех регенеративных воздухоподогревателей.

Защита от повышения частоты вращения ротора. Частота вращения вала турбогенератора, включенного в электрическую систему, должна поддерживаться вблизи постоянного значения с высокой точностью для поддержания частоты сети. Эту задачу выполняет специальная система регулирования. Увеличение частоты вращения на 10 % сверх допустимой из-за отказа системы регулирования или по другим причинам вызывает срабатывание автомата безопасности, воздействующего на мгновенное закрытие стопорного клапана перед турбиной и на прекращение подачи пара в проточную часть.

Защита от сдвига ротора. Вращающийся ротор имеет некоторую свободу продольного перемещения относительно статора. Численное значение этого перемещения весьма мало (до $\pm 1,2$ мм для различных типов турбин) и ограничивается упорным подшипником турбогенератора. Однако из-за износа рабочих поверхностей или превышения расчетного усилия может произойти продольное смещение ротора, превышающее допустимое значение. Если при этом не принять соответствующих мер (частичный или полный сброс нагрузки либо останов турбины), то чрезмерный сдвиг ротора вызовет повреждение концевых уплотнений или лопаточного аппарата турбины. Современные турбогенераторы оснащаются специальным защитным устройством, воздействующим на останов турбины при чрезмерном осевом сдвиге ротора. Действие этого устройства, в котором первичным прибором, фиксирующим изменения положения ротора относительно статора, служит индукционный датчик, поясняется на рис. 14.6.

Кольцевой выступ 1 на валу ротора располагается в магнитном поле Ш-образного трансформатора 2. На укороченном среднем стержне трансформатора расположена обмотка питания, подключенная к источнику переменного тока 3, наводящая магнитные потоки M_1 и M_2 в крайних стержнях, на которых имеются обмотки с одинаковым числом витков. При равенстве воздушных зазоров a и b потоки M_1 и M_2 равны, а следовательно, равны и наводимые в их обмотках ЭДС. В этом положении фиксируется нулевой сдвиг ротора. При продольном сдвиге ротора изменяются зазоры a и b , а следовательно, потоки M_1 и M_2 и наводимые ими ЭДС. Результирующее напряжение вторичной обмотки выпрямляется на выпрямителе 4, питающем цепь, состоящую из обмотки сигнального реле 2РЭС и обмотки первичного реле осевого сдвига 1РОС, действие которого через промежуточное

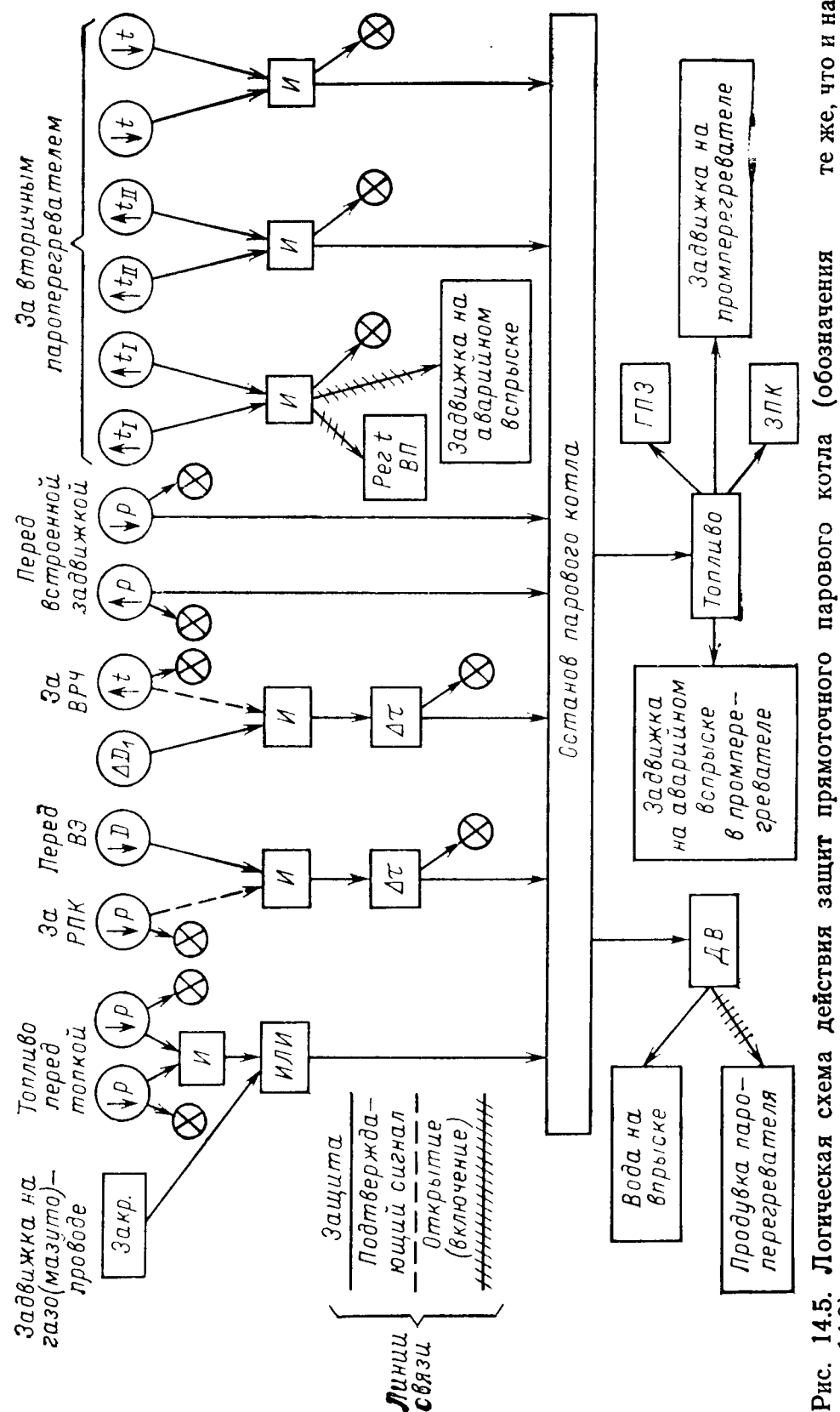


Рис. 14.5.
рис. 14.3)

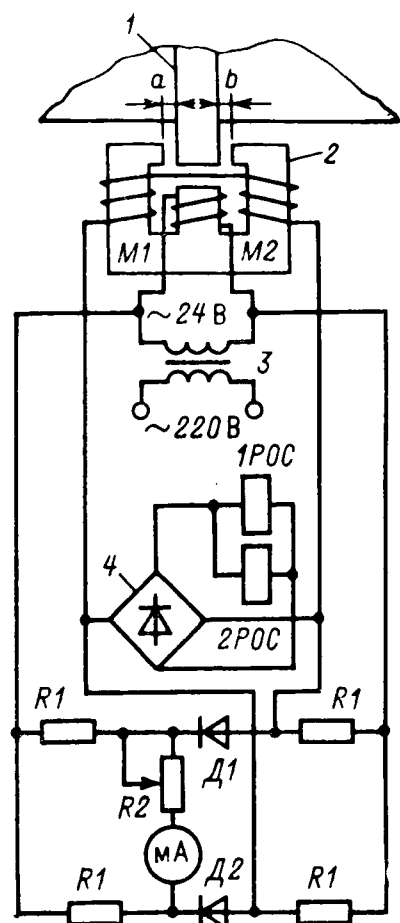


Рис. 14.6. Реле осевого сдвига ротора турбины (принципиальная схема действия)

предупредительные меры. В этом случае необходимо вмешательство автоматической защиты, действующей на останов турбины во избежание серьезного ее повреждения. Сигнал для защиты при срыве вакуума формируется с помощью специального вакуум-реле, которое через промежуточное реле воздействует на электромагнитный привод, управляющий механизмом мгновенного закрытия стопорного клапана.

Защита от понижения давления масла в системе смазки и охлаждения подшипников. В нормальном режиме работы масло в систему смазки подшипников поступает при заданном избыточном давлении около 20 кПа (0,2 кгс/см²) от системы гидравлического регулирования турбины. На случай ее отказа предусматривается установка двух резервных маслонасосов. Они могут включаться автоматически по сигналу специального реле давления при непредвиденном уменьшении давления p_m в системе смазки ниже первого $\downarrow p_{mI}$ или второго $\downarrow p_{mII}$ установленного значения.

реле приводит к включению электромагнитного привода, управляющего механизмом мгновенного закрытия стопорного клапана турбины.

Применение датчика с одинаковыми вторичными обмотками позволяет измерять величину смещения ротора в обе стороны, которое фиксируется указательным стрелочным прибором МА, включаемым в диагональ моста, образованного резисторами R . Мост питается переменным напряжением 24 В непосредственно от понижающего трансформатора.

Защита от ухудшения вакуума в конденсаторе. Известно, что ухудшение вакуума $\downarrow v$ в конденсаторе приводит к росту температуры пара в хвостовой части турбины, термическим деформациям громоздких частей корпуса и требует снижения нагрузки. Однако при резком ухудшении вакуума оператор может не успеть своевременно принять

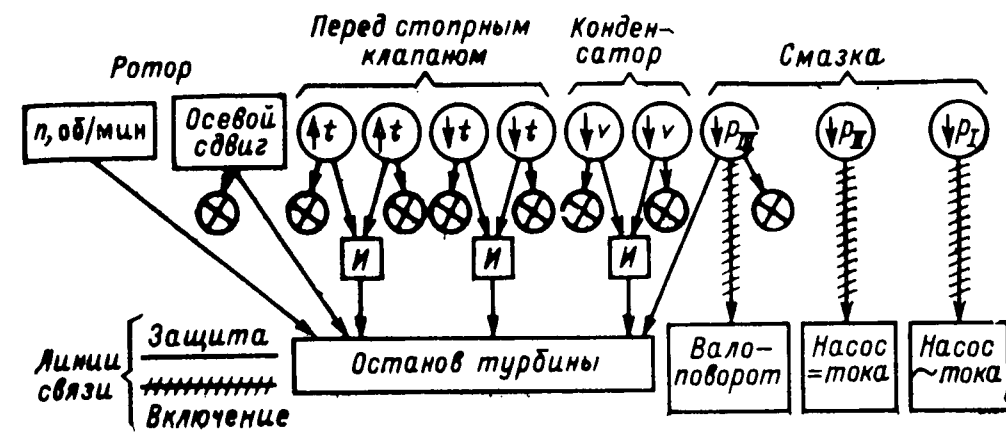


Рис. 14.7. Логическая схема действия защит турбины

При снижении давления масла в системе смазки ниже третьего установленного значения $\downarrow p_{mIII}$ сигнал от реле давления через промежуточное реле воздействует на закрытие стопорного клапана перед турбиной и систему включения ее валоповоротного устройства.

Логические схемы действия защит турбогенератора. На рис. 14.7 изображена схема действия защит турбины без промежуточного перегрева пара. Помимо рассмотренных выше систем защит, на схеме изображена защита от повышения $\uparrow t$ и понижения $\downarrow t$ температуры пара перед стопорным клапаном.

Срабатывание различных защит на останов турбины во всех случаях сводится к мгновенному закрытию стопорных клапанов воздействием на электромагнитные приводы их защелок.

Тепловые защиты электрического генератора. Аварийные или случайные отключения электрического генератора должны приводить к автоматическому отключению турбины. Кроме того, генератор оснащается собственной системой тепловых защит, действующей на его отключение при останове всех маслонасосов уплотнения вала и при прекращении потока охлаждающей воды через статор.

Срабатывание автоматических защит генератора поясняется на рис. 14.8. Оно связано с остановом турбины, отключением генератора от сети и включением автомата гашения поля АГП по сигналам, указанным в схеме в аварийных или предаварийных ситуациях.

Защитные устройства вспомогательных установок ТЭС относятся к так называемым локальным или местным системам автоматических защит. Их действие не связано с остановом основного оборудования и его механизмов,

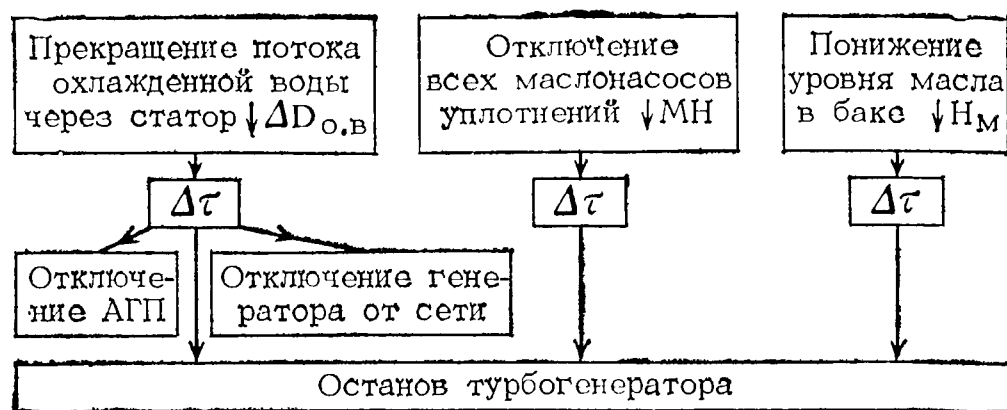


Рис. 14.8. Схема действия тепловых защит электрического генератора

так как вспомогательные установки обычно резервируются или же сравнительно быстро ремонтируются, кроме того, чрезмерное отклонение их регулируемых параметров не оказывает прямого влияния на производительность котлов и выработку электроэнергии.

Защита регенеративных подогревателей высокого давления. Переполнение корпуса ПВД водой до уровня врезки трубопровода греющего пара недопустимо из-за опасности заброса воды в паропровод. Такая опасность возникает при отказе автоматических регуляторов уровня конденсата в ПВД или разрыве змеевиков питательной воды. На этот случай предусматриваются обратный клапан на трубопроводе греющего пара, соединяющем корпус ПВД с камерой греющего пара, отбора, и специальное защитное устройство, воздействующее на систему подачи питательной воды в обвод всей группы ПВД.

Логическая схема действия защит для группы из трех ПВД изображена на рис. 14.9.

Система защиты ПВД от переполнения водой является двухступенчатой и действует по цепочке: датчики уровня ПВД — промежуточные реле — коммутирующие и исполнительные устройства силовых приводов запорных органов на линиях пара и воды. При срабатывании защиты по уровню одного из подогревателей отключается вся группа ПВД одновременно. Отключение по пару осуществляется путем перекрытия доступа греющего пара в каждый из корпусов, отключение по воде — закрытием быстродействующего защитного гидроклапана на входе и выходе ПВД, а также закрытие запорных задвижек на входе и выходе питательной воды данной группы.

Принципиальная схема гидроуправления положением защитного клапана показана на рис. 14.10. Повышение уровня до первого преде-

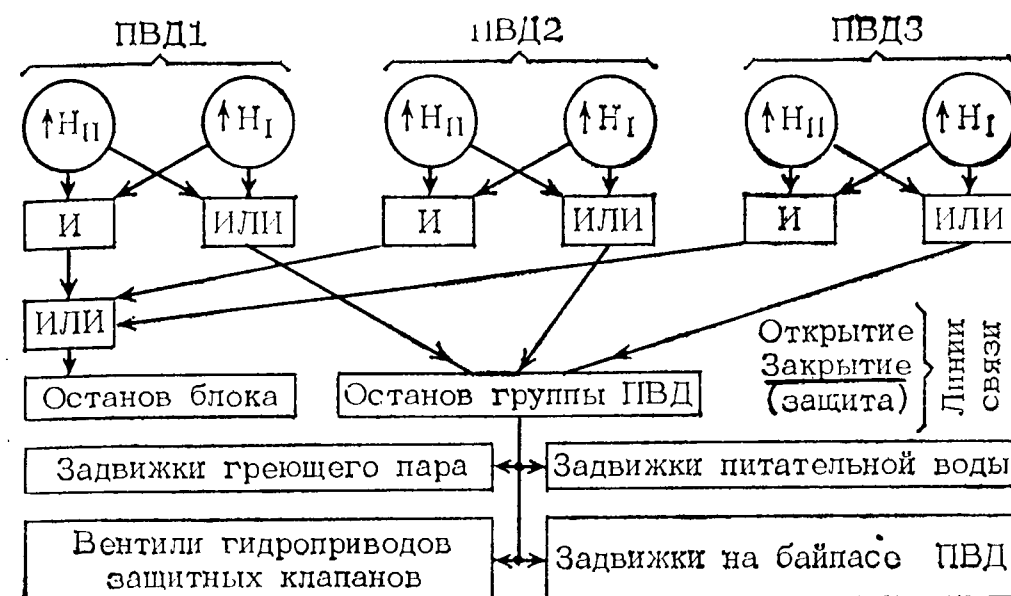


Рис. 14.9. Логическая схема действия защит ПВД

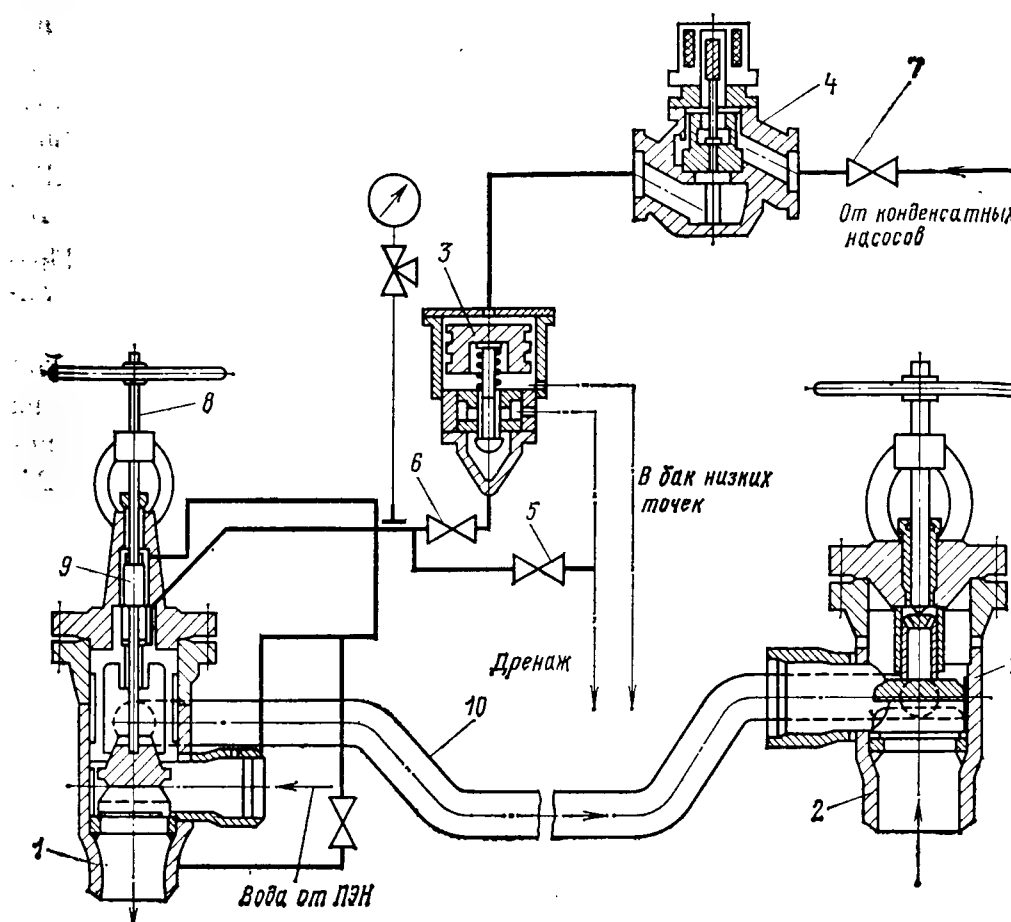
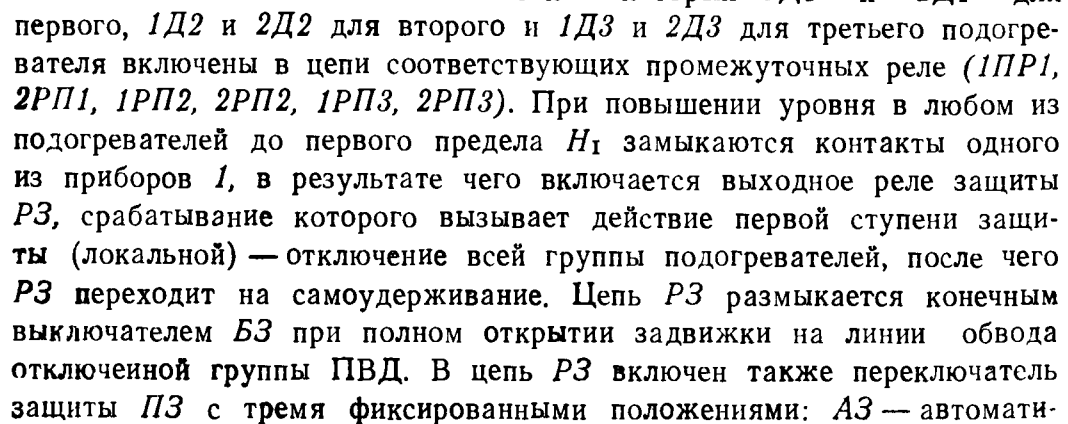


Рис. 14.10. Принципиальная схема гидроуправления положением защитного клапана



ла $\uparrow H_1$ в любом подогревателе вызовет замыкание контактов первичных приборов-уровнемеров, что явится сигналом для действия электромагнитного привода, управляющего клапаном 4. Он откроется, и конденсат от насосов поступит в верхнюю полость гидравлического сервопривода 3, поршень 9 которого, перемещаясь вниз, соединит через импульсную трубку 5 рабочие полости клапанов 1 и 3 с трубопроводом слива. Давление под поршнем 6 клапана 1 упадет, он опустится, закроет своей тарелкой доступ воды в ПВД со стороны питательных насосов и откроет ей проход к котлам через обводную линию 7. При этом обратный клапан 2 перекроет доступ воды в ПВД со стороны котлов. Позиции 8 и 10 (рис. 14.10) обозначают штурвал ручного управления и обводную линию.

294

Независимо от того, включена ли защита с помощью ПЗ, повышение уровня вызывает включение блинкера, относящегося к тому подогревателю, в котором произошло повышение уровня (1РУ, 2РУ, 3РУ). Так как конденсат греющего пара из каждого ПВД поступает в предвключенный ему подогреватель и вследствие этого при повышении уровня в одном из подогревателей может повыситься уровень и в других подогревателях, цепь питания всех блинкеров после срабатывания первого блинкера отключается. Поэтому всегда срабатывает только один из блинкеров и однозначно фиксируется в зависимости от того, в каком подогревателе первым произошло повышение уровня.

Если уровень воды в подогревателе продолжает повышаться и достигает второго аварийного предела $\uparrow H_{II}$, то замыкаются контакты второго прибора 2Д. Одной из причин повышения уровня до второго предела может быть неисправность первой ступени защиты (по каким-либо причинам не замкнулись контакты прибора 1Д). Поэтому при повышении уровня до второго аварийного предела вновь подается команда на включение РЗ и на отключение всей группы ПВД. Если же, несмотря на замыкание контактов прибора 1Д и срабатывание первой ступени защиты, уровень повысится до второго аварийного предела и замкнутся контакты прибора 2Д, то действует вторая ступень защиты (*главная*), вызывающая *останов блока*. Включение реле останова блока (РОБ) происходит в результате срабатывания РП, которое включается соединенными последовательно контактами реле 1РП и 2РП, воздействующими также на отключение генератора при останове всех маслонасосов уплотнения вала и после прекращения потока охлаждающей воды через статор.

295

вибраторов на линиях подвода сырого угля при забивании линий и обрыве подачи топлива. Отключение вибраторов производится после восстановления подачи топлива или по истечении установленной выдержки времени. В системах пылеприготовления с шаровой барабанной мельницей при забивании циклона предусматривается ее отключение.

14.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СИГНАЛИЗАЦИЯ

Для множества величин, контролируемых в процессе управления, достаточно установить лишь факт их нахождения в зоне допустимых значений или отклонения за ее пределы. Для этих целей в помощь оператору выделяется специальная группа технических средств, предназначенных для контрольного чтения представляемой информации,— подсистема технологической сигнализации (ТС). Устройства ТС оповещают персонал о происшедших нарушениях технологического процесса, установленных режимов работы основного и вспомогательного оборудования или же о неисправностях в самой АСУ ТП ТЭС. Для оповещения персонала применяют акустические и зрительные индикаторы. Звуковая сигнализация обычно выполняется двухтональной. Первый тон — звонок или зуммер — включается при подаче предупредительного сигнала; второй — сигнал более мощного звучания, обычно сирена, — оповещает персонал об авариях или аварийных отключениях. Визуальная сигнализация, обычно световая, осуществляется сигнальными лампами с двухцветным (красным или зеленым) кодированием состояния объекта или же с помощью двухламповых или одноламповых табло. На светящихся транспарантах табло высвечивается надпись, указывающая причину появления сигнала. Количество световых сигналов в системах управления крупными энергоблоками сравнительно велико — до 300 единиц на один операторский пост. Обнаружить появление нового сигнала среди уже светящихся может оказаться затруднительным. Поэтому каждый вновь поступающий сигнал должен выделяться прерывистым свечением (мерцанием).

В качестве примера реализации описанных принципов организации технологической сигнализации на рис. 14.12 приводится двухрелейная электрическая схема сигнализации на базе двухлампового светового табло и серийной аппаратуры (резисторы, конденсаторы, полупроводниковые элементы и т. п.). Работа этой системы протекает следующим образом. В исходном режиме лампы $Л1$ и $Л2$ подключены к отрицательному полюсу источника питания — шинке ШСТ. При замыка-

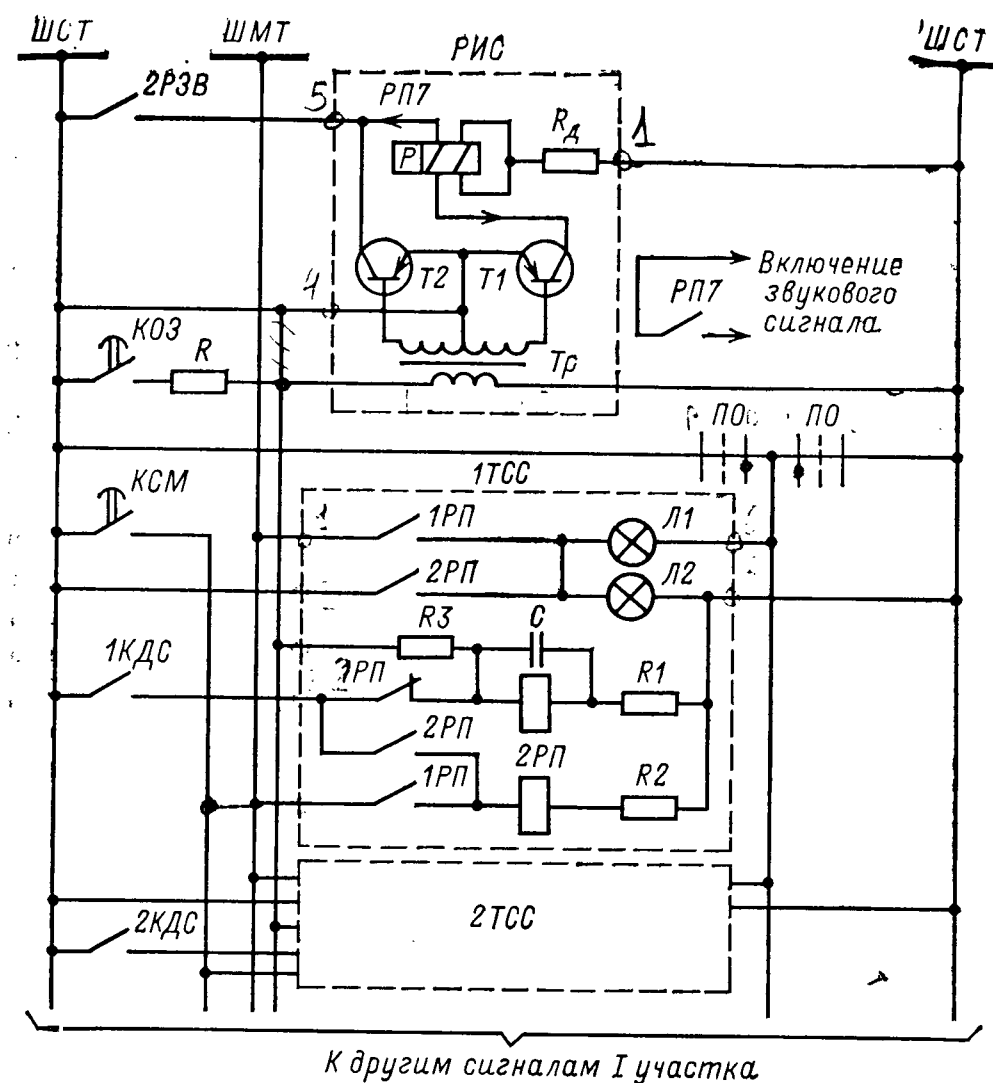


Рис. 14.12. Принципиальная электрическая схема технологической сигнализации

нии контактов датчика сигнала *1КДС* срабатывает реле *1РП* и под-
ключает лампы к шинке «мигания» *ШТМ*, на которой с частотой
1—2 Гц появляется плюс источника питания. В результате лампы на-
чинают мигать и табло светится прерывистым светом. Одновременно
с этим срабатывание реле *1РП* подготавливает цепь включения реле
2РП. Кроме того, при замыкании контактов *1КДС* по цепи, образован-
ной контактом реле *2РП* и резистором *R3*, протекает ток через первич-
ную обмотку трансформатора *T_p* реле импульсной сигнализации РИС.
В момент появления тока в первичной обмотке трансформатора *T_p*
на его вторичной обмотке возникает ток, который усиливается транзи-
стором *T1* и вызывает срабатывание поляризованного реле *РП7*. При
этом якорь поляризованного реле перебрасывается и замыкает кон-
такт, включающий звуковой сигнал. Одновременно с включением
звукового сигнала замыкаются контакты реле *2РЗВ* в центральной

части схемы технологической сигнализации и тем самым подается напряжение на вторую обмотку реле *РП7*. Якорь этого реле переходит в исходное положение. Следовательно, реле *РИС* оказывается подготовленным к включению при появлении следующего сигнала. Если контакты *1КДС* разомкнутся до съема звукового сигнала оператором, то возникающий при этом в трансформаторе *Т_р* сигнал тока, усиленный транзистором *Т2*, вызовет также включение второй обмотки реле *РП7* и возврат якоря этого реле в исходное положение с одновременным отключением звукового сигнала.

После того, как вновь появившийся мигающий световой сигнал замечен, оператор нажимает кнопку съема мигания *КСМ*, в результате чего включается реле *2РП*. При этом реле *1РП* отключается. Однако якорь реле отпадает с некоторой задержкой благодаря тому, что параллельно его обмотке подключен конденсатор *С*. Эта задержка обеспечивает надежное срабатывание реле *2РП* по цепи, образованной контактом *1КДС* и замыкающим контактом реле *2РП*. Отключение реле *1РП* и включение реле *2РП* приводят к переключению ламп с шинки мигающего света *ШМТ* на шинку *+ШСТ*, в результате чего табло начинает светиться ровным светом. Включение реле *2РП* приводит также к прекращению протекания тока через сопротивление *Р3* и первичную обмотку трансформатора в реле *РИС*. Вследствие этого постоянный ток протекает через первичную обмотку трансформатора ограниченное время. Сопротивление *Р3* выбрано таким, чтобы при появлении сигнала и замыкании контакта *2КДС* изменение тока через первичную обмотку трансформатора составляло примерно 50 мА. В этом случае обеспечивается четкое срабатывание реле *РП7*, а насыщение трансформатора наступает только при протекании через него тока от 18—20 табло одновременно. Так как после каждого съема мигания происходит отключение табло от реле *РИС*, трансформатор практически не насыщается и реле *РИС* оказывается всегда готовым к работе.

При исчезновении причины, вызвавшей появление сигнала, контакт *1КДС* размыкается, в результате чего отключается реле *2РП*, размыкается его контакт в цепи ламп и свечение табло прекращается. При этом замыкается также контакт *2РП* в цепи реле *1РП* и табло оказывается готовым к приему сигнала. Опробование ламп сигнальных табло осуществляется переключателем опробования *ПО*. При повороте рукоятки этого переключателя из положения «работа» в положение «опробование» на каждом из табло, связанных с этим переключателем, лампы *Л1* и *Л2* соединяются последовательно и подключаются к обоим полюсам источника питания. Опробование реле *РИС* и звуковой сигнализации производится кнопкой опробования звукового сигнала *КОЗ*, при нажатии которой первичная обмотка трансформатора реле *РИС* через резистор подключается к источнику питания схемы. В приведенной схеме предусматривается применение табло, в которых,

кроме ламп *Л1* и *Л2*, устанавливаются также реле *1РП* и *2РП*, добавочные резисторы *Р1*, *Р2*, *Р3* и конденсатор *С*.

Схема, приведенная на рис. 14.12, относится к системе сигнализации участков, выделенных по функционально-групповому признаку. Аналогично выполняются схемы других участков (групп), в каждой из которых объединяется до 60—80 контролируемых параметров какого-либо одного крупного или группы вспомогательных агрегатов, например по контролю температуры нагрева подшипников вращающихся механизмов котла (дымососов, вентиляторов и т. п.).

Построение электрических схем сигнализации с соблюдением принципа разделения на независимые участки (группы) позволяет снизить вероятность полных отказов систем технологической сигнализации и повысить их ремонтпригодность в условиях непрерывной эксплуатации основного оборудования.

Электрическое питание схем технологической сигнализации осуществляется постоянным током от собственного источника. Раздельное питание обусловлено повышенной вероятностью отказов в разветвленных цепях технологической сигнализации, обладающих сравнительно низкой электрической изоляцией по отношению к земле.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит назначение устройств тепловой защиты?
2. Перечислите основные виды защит барабанного парового котла.
3. Поясните принцип действия импульсного предохранительного устройства (см. рис. 14.1).
4. Перечислите основные виды защит прямооточного парового котла.
5. Назовите основные виды защит паровых турбин.
6. Поясните принцип действия автоматической защиты от переполнения корпусов ПВД водой (см. рис. 14.9).
7. Назовите защиты питательно-деаэрационной установки.
8. Охарактеризуйте защитные устройства РОУ.
9. Назовите виды защит системы пылеприготовления.
10. Поясните назначение технологической сигнализации.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ БЛОКОВ

15.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТОВ, РЕЖИМЫ РАБОТЫ И СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Концентрация выработки электроэнергии на крупных блочных ТЭС и АЭС, осуществляемая в соответствии с Энергетической программой СССР, повышение их роли в покрытии графиков тепловой и электрической нагрузок требуют внедрения высокоавтоматизированных систем управления с использованием современных средств вычислительной техники.

Современный энергетический блок ТЭС включает один (моноблок) или два (дубль-блок) котла и турбогенератор с их вспомогательными установками. Блок связывается с энергетической системой отдельным электрическим трансформатором. Котлы блочных ТЭС (прямоточные или барабанные), как правило, не соединяются общим паропроводом. Турбины состоят из ЦВД и ЦСД, между которыми встроен вторичный (промежуточный) пароперегреватель, и ЦНД. Главная задача управления энергоблоком состоит в выработке заданного количества электроэнергии в каждый момент времени при минимуме расхода топлива на выработанный 1 кВт·ч.

Основными регулирующими воздействиями блочной установки служат перемещения регулирующих органов подачи топлива B_T и питательной воды $D_{п.в}$ котлов и регулирующих клапанов турбины $h_{кл}$; основными регулируемы величинами — активная электрическая мощность генератора N и частота вращения ротора турбины n , соответствующая частоте сети f . Схема связей между входными (регулирующими) воздействиями и выходными величинами изображена на рис. 15.1.

Кроме того, на энергоблоке имеется большое количество промежуточных параметров, требующих непрерывной стабилизации для обеспечения нормальной работы (темпера-

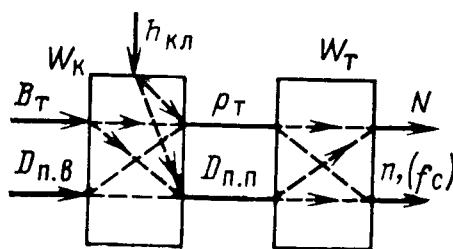


Рис. 15.1. Схема связей между входными (регулирующими) воздействиями и основными регулируемыми величинами энергоблока

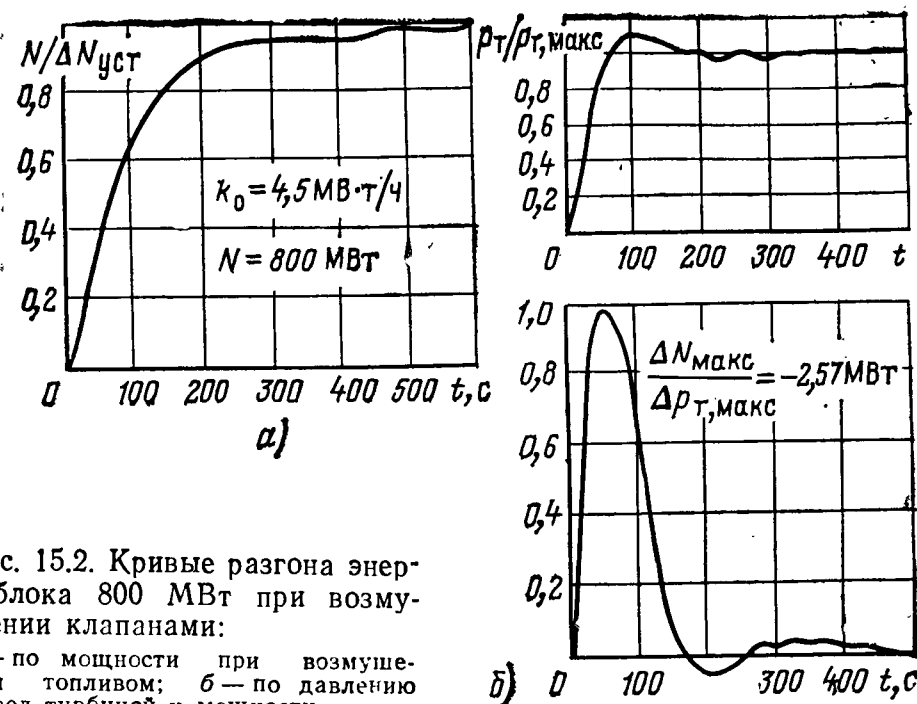


Рис. 15.2. Кривые разгона энергоблока 800 МВт при возмущении клапанами:

а — по мощности при возмущении топливом; б — по давлению перед турбиной и мощности

тура пара по тракту, разрежение вверху топки, уровни воды в барабане, подогревателя, конденсаторе и др.).

Динамика энергоблока по важнейшим каналам регулирующих воздействий определяется уравнением (2.6). Типичная кривая разгона энергоблока по каналу топливо — мощность приведена на рис. 15.2, а; по каналу клапаны (давление) — мощность — на рис. 15.2, б.

Основной способ регулирования активной мощности турбогенератора основан на передаче воздействий по каналу клапаны — мощность. Он осуществляется перемещением регулирующих клапанов турбины $h_{кл}$ под действием регулятора частоты вращения (поз. 2 на рис. 11.6) или электрического синхронизатора турбины (поз. 5 на рис. 11.6). Другой способ основан на передаче воздействий по каналу давление — мощность путем изменения начального давления пара перед турбиной. Регулирующим воздействием в этом случае служит изменение подачи топлива в топку. К этому же способу относится работа блока на скользящих параметрах пара при развороте блока от холостого хода до набора 50—70 % номинальной мощности.

Важнейшей характеристикой блоков с точки зрения регулирования частоты и мощности служит *приемистость*, которая характеризует способность блока изменять тепловую нагрузку и электрическую мощность в переходных режимах вслед за изменением задания по мощности.

Приемистость энергоблока определяется по формуле

$$P = \frac{\int_0^{t_3} \Delta N_{\phi} dt}{\int_0^{t_3} \Delta N_3 dt}, \quad (15.1)$$

где ΔN_{ϕ} , ΔN_3 — приросты фактической и заданной мощности; $0-t_3$ — заданный промежуток времени (отрезок времени на диспетчерском графике электрической нагрузки).

Более высокой приемистостью обладает блок, обеспечивающий наиболее быстрый переход на новую нагрузку. При этом основные и промежуточные параметры блочной установки не должны выходить за пределы допустимых отклонений.

Анализ существующих графиков электрической нагрузки, обеспечиваемых блоками, позволяет выделить две характерные составляющие: первая — постоянная (последовательность стабильных уровней); вторая — колебательная. Постоянная составляющая поддается достаточно точному прогнозированию. Блоки, участвующие в ее покрытии, работают в *базовом режиме*. Колебательная составляющая обусловлена работой потребителей с быстроменяющейся нагрузкой и носит случайный характер. Обеспечение последней является наиболее сложной задачей, выполнение которой падает на ТЭС и энергоблоки, действующие в *регулирующем режиме*.

В регулирующем режиме АСУ ТП ТЭС решают следующие задачи:

1) непрерывное поддержание соответствия производства и потребления электроэнергии при устойчивой работе электростанций и энергоблоков;

2) распределение переменного задания по нагрузке между отдельными энергоблоками при существующих издержках производства (расход топлива, себестоимость электроэнергии и др.);

3) участие в регулировании перетоков мощности между отдельными частями энергосистемы.

Решение перечисленных задач в энергетике называют регулированием частоты и мощности, а режимы, в которых работают электростанции или крупные энергоблоки, участвующие в решении этих задач, называют *регулирующими режимами*.

15.2. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ЭНЕРГОБЛОКА

В базовом режиме управление блоком осуществляется по принципу поддержания постоянства тепловой нагрузки котла. При этом внутренние возмущения устраняются системами регулирования подачи топлива или питательной воды, внешние — регулятором давления пара «до себя», действующим на регулирующие клапаны через механизм управления турбиной (МУ) (см. рис. 11.6). Регулятор «до себя» защищает котел от чрезмерного снижения давления пара, но не обеспечивает участия блока в регулировании частоты и мощности. Более того, он препятствует использованию аккумулирующей способности элементов котла, паропровода и блочной установки в целом, усугубляет нехватку пара при набросах электрической нагрузки, воздействуя на закрытие регулирующих клапанов турбины.

Следовательно, аккумулирующая способность всех элементов на стороне пара не используется именно тогда, когда за ее счет можно частично покрывать изменения нагрузки.

Введение зоны нечувствительности у регулятора «до себя» дает некоторое повышение приемистости энергоблока, так как в пределах этой зоны используется аккумулирующая способность котла.

Задача АСР энергоблока в регулирующем режиме состоит в том, чтобы довести приемистость блоков до значений, обеспечивающих их эффективное участие в регулировании частоты. Известно, что паровой котел и турбогенератор обладают существенно различными динамическими свойствами. Так, инерционность турбогенератора при возмущении по каналу регулирующие клапаны — мощность измеряется секундами (рис. 15.2, б), а постоянная времени парового котла по расходу пара и блока по мощности при воздействии топливом для блоков, работающих на твердом топливе, достигает сотен секунд, а для газомазутных блоков — десятков секунд [18] (рис. 15.2, а).

Последовательное соединение инерционного парогенератора и малоинерционной паровой турбины, а также наличие механических напряжений в ее лимитирующих элементах (упорный подшипник, лопаточный аппарат, диафрагмы) ограничивают диапазон и скорость изменения нагрузки энергоблока в целом.

В целях увеличения приемистости энергоблоков в регулирующем режиме добиваются повышения быстродействия АСР мощности. Для этого предусматривается введение

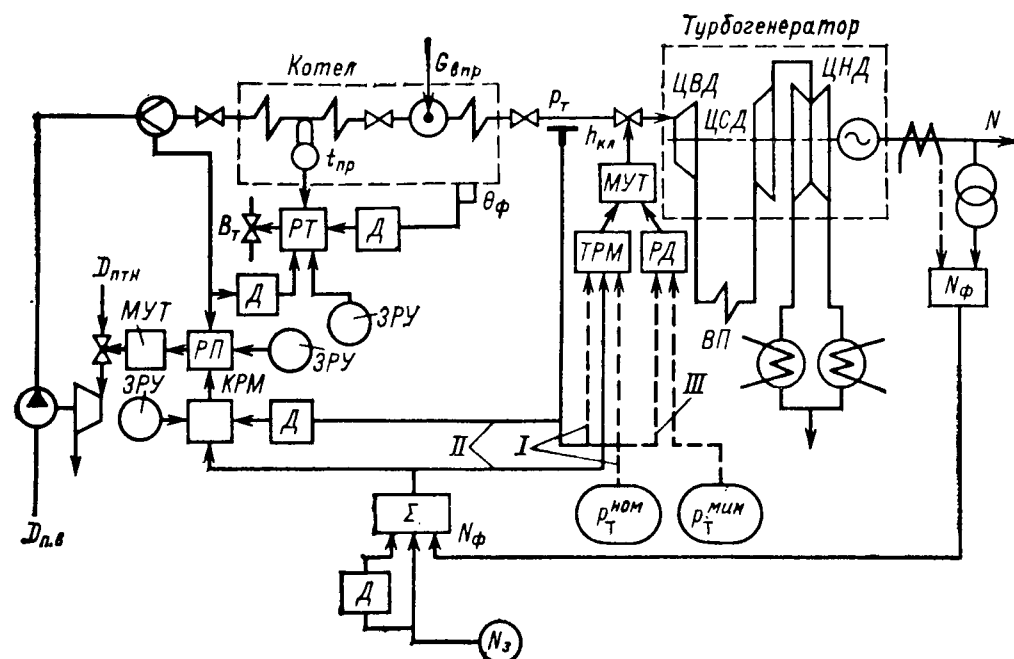


Рис. 15.3. Регулирование мощности блочной установки 300 МВт:
I — базовый режим; II — регулирующий режим; III — режим ограничения по давлению $p_{\text{мин}}$

форсирующих сигналов, подаваемых на вход регуляторов мощности турбин и котлов [18].

Ниже в качестве примера рассматривается схема АСР мощности блочной установки, участвующей в регулировании частоты и активной мощности энергетической системы. Функциональная схема АСР для блока 300 МВт, работающего на пылеугольном топливе, с котельным и турбинным регуляторами мощности показана на рис. 15.3. Основным входным сигналом котельного регулятора мощности КРМ служит разность заданного и фактического значений мощности $N_z - N_{\text{ф}}$. Для улучшения динамики регулирования котла по мощности предусматриваются дополнительные сигналы по скорости изменения давления пара p_t и заданной мощности N_z , формируемые дифференциатором D . Обычно КРМ состоит из регулирующего прибора и интегратора и служит задатчиком по мощности для регулятора питания РП котла водой. В рассматриваемом случае РП выполняет функции регулятора тепловой нагрузки, работающего по схеме задание — вода и описанного ранее (см. рис. 11.23). Регулирование температурного режима первичного тракта осуществляется регулятором топлива РТ, действующим по основному сигналу $t_{\text{пр}}$ и дополнительным сигналам $d\theta_{\text{ф}}(t)/dt$ и $D_{\text{п.в}}(t)/dt$, формируемым дифференциаторами.

На случай возникновения температурного перекося на выходе первичного тракта прамоточного котла предусматривается регулятор выравнивания температур пара по ниткам. Назначение последнего состоит в автоматическом распределении расходов воды по ниткам

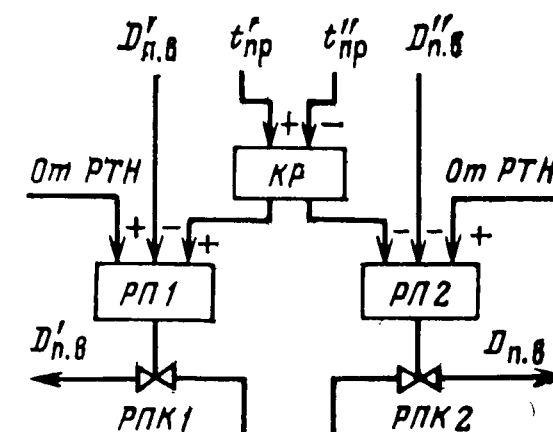


Рис. 15.4. Функциональная схема АСР по выравниванию перекоса температур по полупотокам

в зависимости от небаланса температур $t'_{\text{пр}} - t''_{\text{пр}}$ на выходе промежуточных поверхностей нагрева первичного пароводяного тракта (сигнал по температуре пара в промежуточной точке тракта для АСР подачи топлива в этом случае формируется на выходе последующих поверхностей нагрева по ходу пара).

Один из вариантов функциональной схемы АСР для этого случая показан на рис. 15.4. Внутренние возмущения, приводящие к перекосу температур, будут компенсироваться корректирующим регулятором $KР$, изменяющим задания ведомым регуляторам распределения воды по ниткам $РП1$ и $РП2$ с разным знаком. При этом суммарный расход питательной воды на котел не изменится. При внешнем возмущении — изменении сигнала задания по нагрузке на энергоблок, формируемого на выходе регулятора тепловой нагрузки $РТН$, $РП1$ и $РП2$ будут однозначно изменять расходы воды в паровой котел по своим ниткам, воздействуя на $РПК1$ и $РПК2$.

Турбинный регулятор мощности (ТРМ) может работать в различных режимах. При нагрузках, близких к максимальной, основным сигналом ТРМ служит $p_T - p_{\text{ном}_T}$ (см. рис. 15.3, вариант I), в регулирующем режиме $N_3 - N_{\text{ф}}$. При этом предусматривается упреждающий сигнал $dN_3(t)/dt$, формируемый дифференциатором и способствующий повышению приемистости блока в целом (см. рис. 15.3, вариант II).

15.3. УПРАВЛЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТЬЮ ГРУППЫ ЭНЕРГОБЛОКОВ

Колебание электрической нагрузки вызывает изменение частоты электрической сети, которое воспринимается регуляторами частоты вращения турбин, действующими на положение паровпускных клапанов. Распределение нагрузки между турбогенераторами зависит от статических характе-

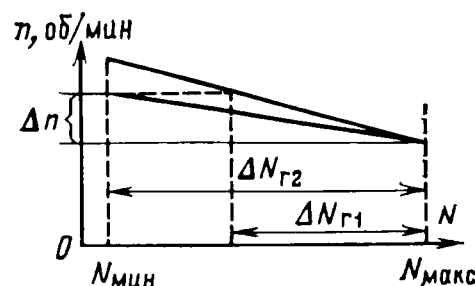


Рис. 15.5. Статическая характеристика регулятора частоты вращения (мощности) турбогенератора

ристик регуляторов (рис. 15.5) и характеризуется коэффициентом статизма, %,

$$\delta = (n_{\max} - n_{\min}) / n_{\max}. \quad (15.2)$$

Обычно δ находится в пределах 1,5—3 %. Турбины с более пологой статической характеристикой регуляторов воспринимают большие колебания нагрузки при одном и том же изменении частоты Δn ($\Delta N_{Г1} < \Delta N_{Г2}$).

Регулирование мощности регуляторами частоты вращения считается *первичным* регулированием. Статическая точность первичного регулирования определяется выражением

$$\Delta N_s = \frac{\Delta f_{\text{ош}} + \Delta f_p}{\delta} N_s^{\text{ном}},$$

где $\Delta f_{\text{ош}}$ — статическая ошибка промышленного регулятора по частоте; Δf_p — зона нечувствительности; δ — коэффициент статизма [см. (15.2)]; $N_s^{\text{ном}}$ — номинальная мощность агрегата.

Для $f_{\text{ош}} = \Delta f_p = 0,1\%$ и $\delta = 1,5 + 3\%$ значение $\Delta N_s = (0,066 \div 0,133) N_s^{\text{ном}}$.

Описанный выше способ регулирования, отличающийся низкой точностью и допускающий самопроизвольное изменение электрической нагрузки отдельных турбоагрегатов при колебаниях частоты сети, нельзя считать удовлетворительным. В особенности это относится к ТЭС с большим числом агрегатов, участвующих в регулировании перетоков мощности по линиям электропередачи системы. В связи с недостатками одного первичного регулирования и сложностью экономичного управления мощностью большой группы энергоблоков разработаны общестанционные автоматические системы регулирования частоты и активной мощности (АСРЧМ). Последние служат надстройкой над АСР мощности энергоблоков и отдельных его агрегатов. Они действуют по сигналам задания от вышестоящей системы управления и осуществляют *вторичное* регулирование частоты и активной мощности. Формирование сигналов зада-

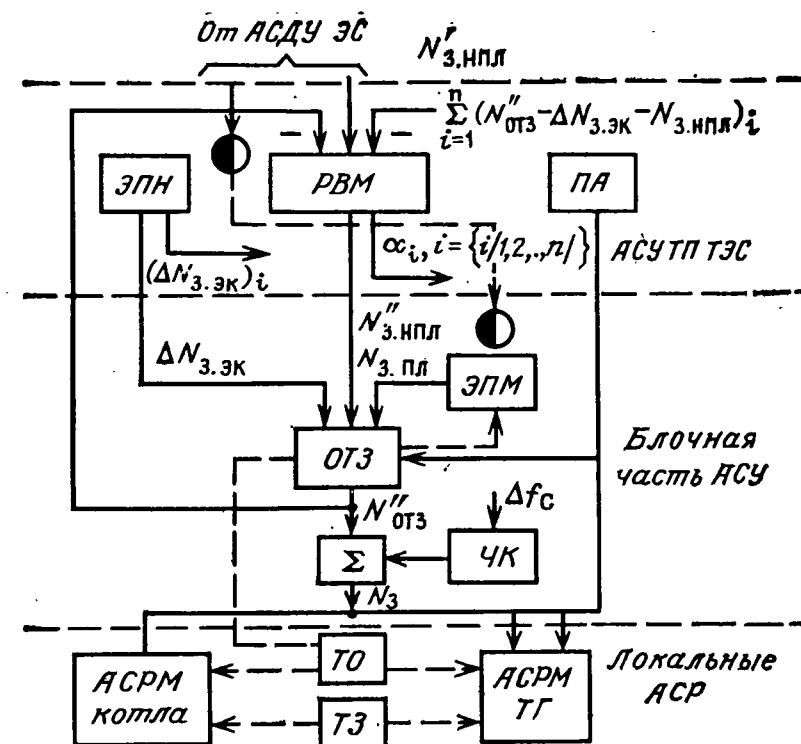


Рис. 15.6. Функциональная схема АСРЧМ блочной тепловой электростанции

ния N_3 для блочных подсистем управления происходит на верхнем уровне АСРЧМ ТЭС.

В качестве примера на рис. 15.6 приводится функциональная схема АСРЧМ ТЭС, состоящей из нескольких взаимодействующих устройств. АСРЧМ ТЭС в целом предусматривает участие энергоблоков в покрытии плановой $N_{з.пл}$ и внеплановой $N_{з.нпл}$ составляющих суммарной электрической нагрузки ТЭС. Значение N_3 для всех блоков ТЭС вначале формируется с помощью общестанционного регулятора внеплановой мощности РВМ, который реализуется на основе регулирующего прибора РП с интегратором на выходе. На вход РП поступает внеплановая составляющая активной мощности от АСДУ ЭС (см. § 16.1) и суммарный сигнал обратной связи от внеплановых составляющих активной мощности, отработанных отдельными

энергоблоками $\sum_{i=1}^n (N_{отз}'' - N_{з.пл} \Delta N_{з.эк})$. Выходной сигнал интегратора РВМ через делители $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n$ поступает на вход КРМ и ТРМ энергоблоков и определяет долю участия каждого из них в покрытии внеплановой составляющей активной мощности $N_{з.нпл}$, поступающей от АСРЧМ ТЭС. Заданное значение плановой составляющей мощности формируется в специальном устройстве — задатчике плановой мощности ЗПМ, используемом для управления энергобло-

ком в режиме изменения активной мощности по графику нагрузки. Текущая нагрузка $N_{з.пл}$ формируется по сигналам заданной конечной мощности и заданной скорости изменения нагрузки dN_z/dt , которые могут устанавливаться непосредственно персоналом энергоблока по индивидуальному закону с учетом ограничений скорости набора мощности. Темп изменения $N_{з.пл}$ устанавливается импульсатором (регулирующим прибором релейно-импульсного действия) с интегратором на выходе. Скважность управляющих импульсов пропорциональна $dN_z(t)/dt$. Воздействия импульсатора блокируются при наличии технологических ограничений по котлу, турбине или блоку в целом.

Суммарный сигнал с выходов РВМ и ЭПМ корректируется устройством экономичного распределения нагрузок между энергоблоками ЭПН. Алгебраическая сумма сигналов $N_{з.пл}$ и $N_{з.плл}$, скорректированная устройством ЭПН, вырабатывающим сигнал коррекции $N_{з.эк}$, поступает на вход ограничителя темпа задания мощности ОТЗ, который предназначен для ограничения результирующего сигнала N_z в динамике. Ограничитель темпа реализуется обычным регулирующим прибором с интегратором на выходе. При наличии ограничений предусматривается устройство, вырабатывающее соответствующий сигнал. Например, при ограничении по термическому напряжению металла турбины используется сигнал по положению регулирующих клапанов, измененный тем или иным способом и пропущенный через дифференциатор. Выходной сигнал устройства ограничения сравнивается с максимальным допустимым значением. В случае превышения последнего срабатывает устройство блокировки, разрывающее цепь управления интегратора на выходе ОТЗ. Вследствие этого сигнал на выходе ОТЗ останется неизменным, несмотря на рост суммарного сигнала на входе. При отсутствии ограничения сигнал на выходе ОТЗ отслеживает сумму сигналов $N_{з.пл} + N_{з.плл} + N_{з.эк}$ и дополняется сигналом с выхода частотного корректора ЧК, пропорциональным отклонению частоты сети Δf_c .

Система формирования сигнала мощности N_z в АСРЧМ увязывается с технологическим ограничением ТО и работой тепловых защит ТЗ. Так, ввод ограничений на снижение p_T до $p_T^{мин}$ осуществляется заменой суммарного входного сигнала АСРМ турбины по мощности и давлению на сигнал $p_T - p_T^{мин}$. Для этого устанавливается дополнительный регулятор давления пара перед турбиной РД, действующий по принципу «до себя» (см. рис. 15.3, вариант III).

При ограничениях на регулирующие воздействия котла определяющим принимается принцип регулирования параметра, поддержание которого обеспечивается воздействием, достигшим предела.

Например, при исчерпании диапазона регулирующего воздействия по количеству подаваемого в топку воздуха с целью обеспечения его заданного избытка α_T не следует увеличивать расход топлива на данный котел и тем самым поднимать его паровую нагрузку и элект-

рическую мощность блока в целом. При этом ограничение N_z достигается путем блокирования контактов «больше» в цепи управления интегратором на выходе ОТЗ.

При срабатывании ТЗ, действующих, например, на частичную разгрузку энергоблока, АСРЧМ ТЭС отключается от данного блока специальным промежуточным реле. АСРМ котла и турбины переводятся на уровень значений N_z , заданный тепловой защитой (например, снижение до 60 % максимальной нагрузки и др.). Кроме того, предусматривается связь АСРЧМ ТЭС с противоаварийной системой релейной защиты энергосистем. Связь осуществляется воздействием противоаварийной автоматики ПА на цепь управления интегратора на выходе ОТЗ. Новый уровень N_z для АСРМ котла и турбины устанавливается в соответствии с заданным по условиям устойчивой и безопасной работы ЭС.

Управление активной мощностью группы энергоблоков АСРЧМ при отсутствии сигналов запрета от ТЗ и ПА протекает следующим образом. Мощность каждого энергоблока устанавливается в соответствии с графиком электрической нагрузки с помощью ЭПМ. График дополняется внеплановым изменением составляющей активной мощности по сигналам задания от АСДУ. Затем проводится перераспределение активной мощности по условиям экономичности их работы от ЭПН. Все изменения сигнала задания активной мощности, как плановой, так и неплановой, проходят через ОТЗ и дополняются корректирующим сигналом по частоте с выхода ЧК. Результирующий сигнал N_z поступает на вход АСРМ отдельных блоков [21].

15.4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПУСКА ЭНЕРГОВБЛОКОВ

Технологию процессов пуска можно рассматривать как последовательность этапов, каждый из которых характеризуется определенным состоянием запорной арматуры и оборудования и значением или скоростью изменения технологических параметров, контролируемых при пуске.

На каждом этапе требуемая тепловая схема блока может быть собрана путем изменения состояния арматуры и оборудования. Режим изменения параметров должен поддерживаться непрерывно при переходе от одного этапа к последующему.

Для обеспечения надежного и быстрого пуска блоков или отдельных агрегатов из различного исходного состояния необходимо выполнять автоматизацию пусковых процессов и операций и контроль параметров при пуске. Автоматический пуск блока представляет собой совокупность автоматических дискретных операций по управлению состоянием запорной арматуры («открыть» или «закрыть»)

и оборудования («включить», «отключить», «пустить», «остановить»), совершаемых в строгой последовательности, и непрерывных технологических процессов, управляемых с помощью автоматических устройств.

Следует отметить, что динамические характеристики участков регулирования существенно изменяются в процессе пуска. Как правило, динамические параметры этих характеристик, определенные для начального этапа пуска, сильно отличаются от тех же параметров, определенных для конечного этапа пуска или нормального режима работы. Например, запаздывания τ по температурам пара по тракту парового котла по каналу регулирующего воздействия существенно больше, а коэффициенты усиления k — меньше в начальной стадии пуска по сравнению с концом пуска и нормальным режимом. В связи с переходом с растопочного топлива на основное и с изменениями тепловой схемы блока автоматическое регулирование большинства технологических параметров в процессе пуска не может осуществляться штатными регуляторами даже при изменении их настроек и задания. Для этой цели используются пусковые или растопочные АСР. Последние отличаются от штатных наличием устройств дистанционного изменения настроек регуляторов (K_p , T_n), переключением выходного воздействия РП на линию малого расхода в зависимости от стадии пуска или нагрузки блока, а в некоторых случаях количеством или способом формирования входных сигналов.

Автоматизация пусковых операций энергоблоков с барабанным паровым котлом. Ниже в качестве примера приводятся АСР непрерывных процессов пуска из холодного состояния энергоблока мощностью 200 МВт с барабанным паровым котлом производительностью 640 т/ч, работающим при растопке на газовом топливе.

Пуск энергоблока можно представить в виде последовательности следующих основных этапов: 1) осмотр оборудования, установка запорной и регулирующей арматуры в исходное положение; 2) вентиляция топки; 3) продувка газопровода и подготовка растопочных горелок к розжигу (розжиг горелок); 4) прогрев барабана и паропроводов; 5) разворот турбогенератора; 6) синхронизация и включение генератора в сеть; 7) нагружение турбогенератора.

Первые три этапа являются подготовительными и осуществляются персоналом согласно инструкциям по пуску.

Розжиг горелок может производиться персоналом или же автоматически специальными устройствами [18]. Например, прибор автоматического контроля пламени систе-

мы ГСП типа Ф 34.2, построенный на основе интегральных логических микросхем, выполняет следующие функции: преобразование непрерывных сигналов от двух датчиков пламени в дискретные унифицированные сигналы; формирование импульсов для управления катушкой зажигания, генерирующей искру в устье растопочной горелки; формирование необходимой выдержки времени для управления розжигом горелок.

Прогрев барабана и паропровода осуществляется после розжига растопочных горелок нижнего яруса. При этом подача топлива определяется допустимой скоростью прогрева барабана. До момента вскипания воды в барабане устанавливается и поддерживается расход газа через клапан малого расхода. После вскипания воды при избыточном давлении в барабане 0,1 МПа (около 1 кгс/см³) включается автоматическая программная система подъема температуры насыщения (АПС — t_n), действующая в соответствии с рис. 15.7, а по разности сигналов температуры насыщения пара в барабане t_n и задания $u_1(t)$, изменяющегося со скоростью 1,5 °С/мин. При достижении скорости повышения температуры пара за первым впрыском на одной из четырех ниток трубопровода 4 °С/мин АПС — t_n отключается и в работу автоматически включается АПС подъема температуры пара за первыми впрысками со скоростью 4 °С/мин, действующая в соответствии с рис. 15.1, б по разности сигналов температуры пара и задания $t_{впр1} - u_2(t)$.

При прогреве барабана и паропроводов в работу также включается АПС поддержания температуры первичного пара на выходе $t_{п.п.}$, действующая в соответствии с рис. 15.7, в по отклонению $t_{п.п.}$ и исчезающему сигналу за впрыском $t_{впр2}$. Сигнал задания $u_3(t)$ устанавливается с соблюдением важнейшего условия при пуске: разность между температурой пара за котлом и металла верха ЦВД не должна превышать 50 °С.

Разворот турбогенератора. После завершения всех операций предыдущих этапов по прогреву паропроводов, стопорного клапана и цилиндров турбины и после проверки требуемых условий температурного режима оператор блока включает АПС частоты вращения турбины (рис. 15.7, г), а затем программу увеличения n , об/мин, примерный вид которой изображен на рис. 15.8. АПС — n , об/мин, действуя на байпасы ГПЗ, производит толчок турбины, а затем подъем частоты вращения по заданной программе до режима холостого хода (3000 об/мин). На этом этапе остаются включенными АПС — $t_{впр1}$ и АПС — $t_{п.п.}$.

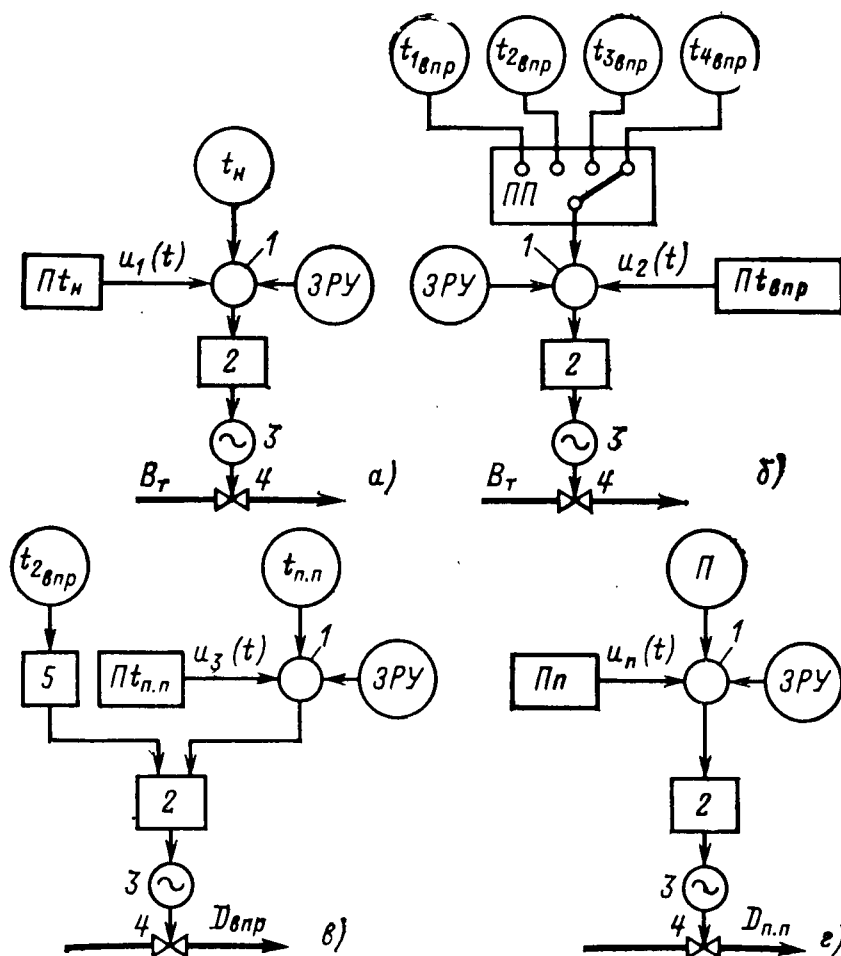


Рис. 15.7. Автоматические программные системы пуска энергоблока: а — АПС подъема температуры насыщения пара в барабане t_n ; б — АПС подъема температуры пара за первым впрыском $t_{впр}$; в — АПС подъема температуры перегретого пара $t_{п.п}$; г — АПС разворота турбины n ; 1 — измерительный блок; 2 — регулирующий прибор; 3 — исполнительный механизм; 4 — регулирующий орган; 5 — дифференциатор; П — устройство формирования программы пуска

Синхронизация и включение генератора в сеть. При наличии режима холостого хода и готовности генератора к включению в сеть оператор блока отключает АПС регулирования частоты вращения турбины. Синхронизация генератора и включение в сеть производятся дежурным персоналом электроцеха в соответствии с инструкциями.

Нагрузка турбогенератора. При пуске блока из любого состояния перед набором нагрузки остаются в работе также АПС температуры первичного пара на выходе. После включения генератора в сеть набор электрической нагрузки осуществляется включением автоматической системы нагружения, воздействующей на регулирующий клапан газового топлива (рис. 15.9). Давление пара перед турби-

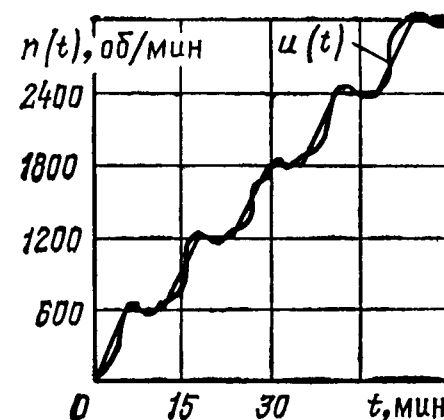


Рис. 15.8. Программа повышения частоты вращения ротора турбины n , об/мин

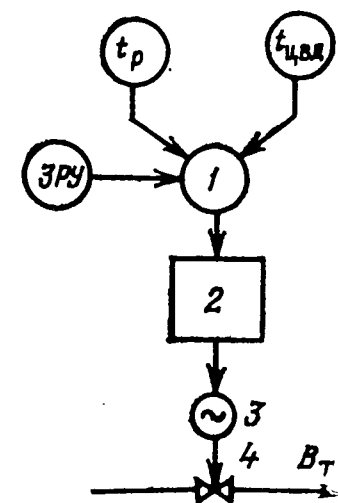


Рис. 15.9. АСР нагружения турбогенератора: обозначения те же, что и на рис. 15.7

ной поднимается с учетом ограничения по разности температур пара в регулирующей ступени ЦВД — t_p и металла в глубинной точке фланца $t_{цвд}$, которая не должна превышать 100°C . Это условие достигается при использовании разности этих температур в качестве входного сигнала автоматической системы нагружения блока. Одновременно на этом этапе включается в работу АСР соотношения *топливо — воздух* по котлу (см. рис. 11.12, а). Включение и отключение всех АПС и логических устройств, формирующих программы повышения параметров, осуществляется оператором воздействием на ключ «этапы пуска» и тумблеры включения и отключения программ. Пусковые программы формируются с помощью УВМ или УЛУ и в виде унифицированных сигналов подаются на вход автоматических регуляторов.

Автоматизация пусковых операций энергоблока с прямоточным паровым котлом. На блоках с прямоточным паровым котлом также автоматизируются основные пусковые операции и процессы, в том числе питания парового котла водой, температурного режима, режима работы пусковых сепараторов по тракту парового котла до растопочных сепараторов и температуры перегретого пара на выходе котла.

В качестве примера на рис. 15.10 приведены системы регулирования подачи пускового резервного электронасоса и рабочего турбонасоса. При пуске блока и подъеме нагрузки до 30 % номинальной используется ПЭН, а затем по мере роста нагрузки осуществляется автома-

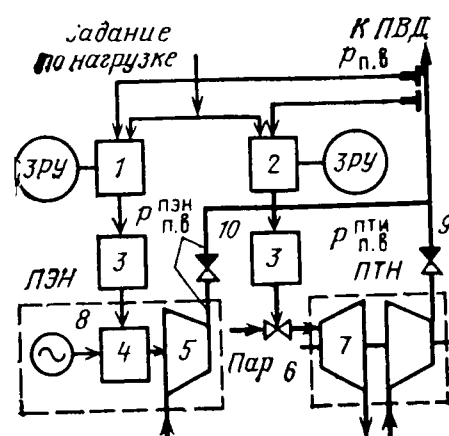


Рис. 15.10. Автоматическое регулирование производительности питательных насосов с электро- и турбоприводами:

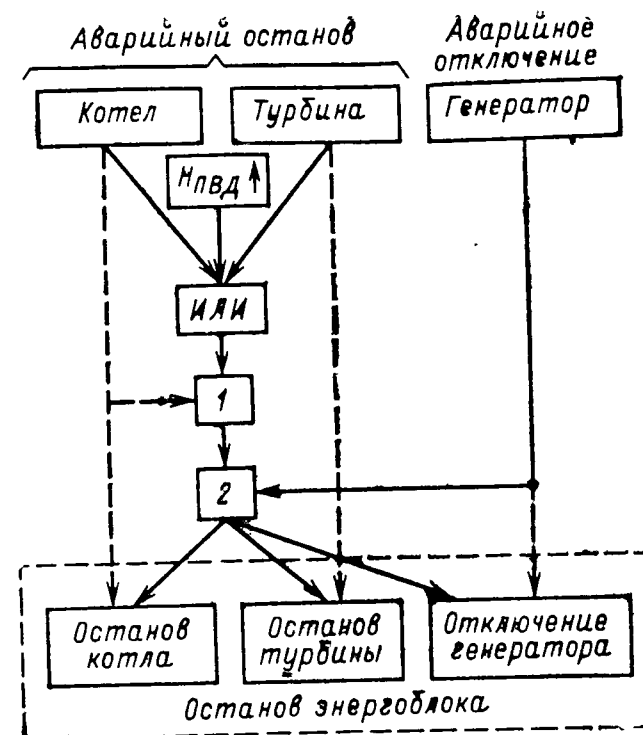
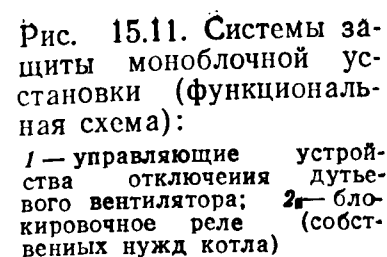
1 — регулятор производительности ПЭН;
2 — регулятор производительности ПТН;
3 — исполнительные механизмы; 4 — гид-
ромуфта; 5 — насосы; 6 — паровой регу-
лирующий клапан; 7 — турбопривод; 8 —
электропривод; 9, 10 — обратные клапаны
ПТН и ПЭН.

тический переход с ПЭН на ПТН. Для этого заданное давление питательной воды регулятору производительности ПЭН1 устанавливается несколько меньшим, чем регулятору производительности ПТН2, поэтому последний устанавливает свой регулирующий орган в положение, соответствующее максимальной частоте вращения турбопривода, т. е. полностью открывает клапан. По мере роста нагрузки блока и давления пара в отборе турбины, питающем ПТН, развиваемый им напор $p_{п.в}^{ПТН}$ начинает расти и превышает напор, развиваемый ПЭН; это приводит к открытию обратного клапана на выходе ПТН. Последний начинает подавать воду в питательную магистраль в параллель с ПЭН. Далее, вследствие большего заданного значения $p_{п.в}^{ПТН}$ ПТН развивает большую, чем ПЭН, производительность, и последний разгружается. По достижении $p_{п.в}$ некоторого предельного значения $p_{п.в}^{пр} > p_{п.в}^{ПЭН}$ обратный клапан на выходе ПЭН закрывается. После этого ПЭН может быть выведен в резерв с возможностью последующего автоматического пуска. Действие системы регулирования подачи насосов при останове блока или глубоких сбросах нагрузки и переход на ПЭН происходят в обратной последовательности.

Автоматическая программная система разворота турбины и регулятор нагружения турбогенератора энергоблока с прямоточным котлом действуют аналогично вышеописанным системам (см. рис. 15.9).

15.5. ОБЩЕБЛОЧНЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ ЗАЩИТЫ

Защитные устройства отдельных агрегатов блока взаимосвязаны; срабатывание защиты одного из агрегатов, приводящее к его останову, служит сигналом для останова других. Это достигается блокированием контактов отключающих устройств котлов и турбогенераторов. Один из вариантов функциональной схемы защитных устройств мо-



ноблока изображен на рис. 15.11. Взаимодействие защит осуществляется в этой схеме следующим образом. Срабатывание защит генератора (см. рис. 14.8) или главного трансформатора, указывающее на серьезные неполадки электрооборудования, приводит к возбуждению первичного реле. Последнее отключает генератор от сети, воздействует на устройство, отключающее напряжение возбуждения и включающее резервное напряжение собственных нужд, и далее через реле блокировки 2 на отключающие устройства паровой турбины (стопорный клапан) и механизмы котла (дутьевой вентилятор и топливоподающие устройства) (см. рис. 14.3 и 14.5).

Срабатывание автомата безопасности турбины, как известно, происходит при превышении частоты вращения турбогенератора сверх номинальной на 10 % (300 об/мин) и приводит к мгновенному закрытию стопорного клапана. При этом генератор отключается от сети. То же происходит при срабатывании остальных защит турбины (падение давления в системе смазки подшипников, чрезмерный осевой сдвиг ротора, потери вакуума и т. п.).

Срабатывание защит котла, приводящее к его останову, передается на отключающие устройства турбогенератора и вызывает останов блока в целом. Помимо защитных устройств отдельных агрегатов от повреждений, блочные

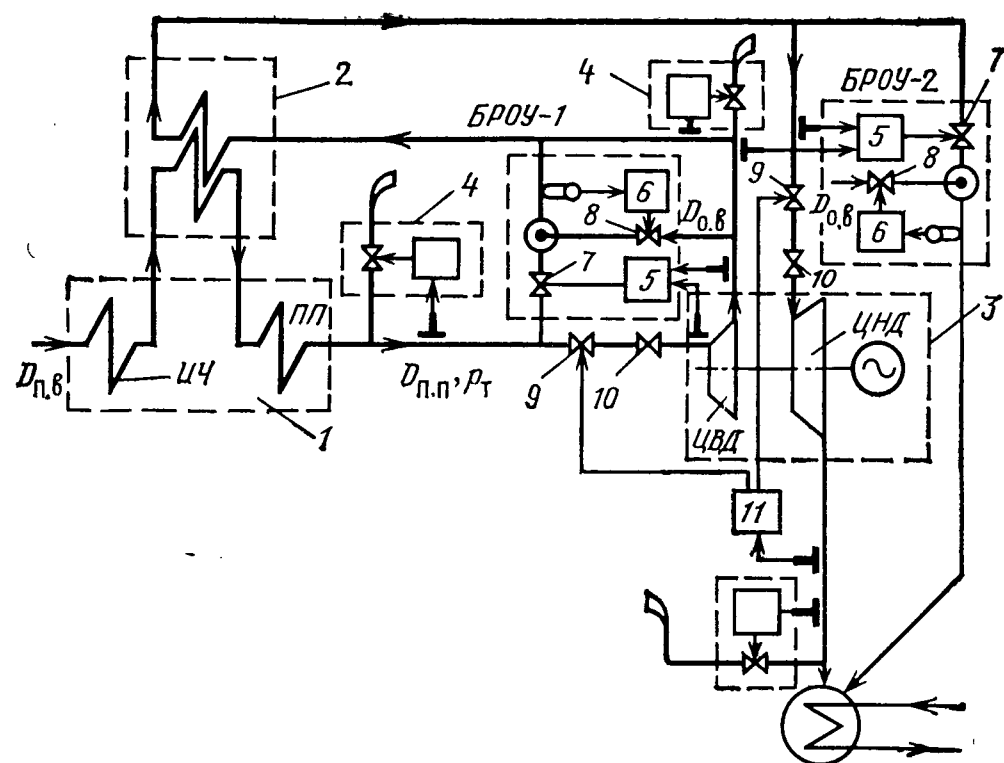


Рис. 15.12. Принципиальная схема защиты блочной установки 200 МВт при сбросах электрической нагрузки:

1 — котел; 2 — вторичный пароперегреватель; 3 — турбогенератор; 4 — предохранительные клапаны; 5 — регулятор давления БРОУ; 6 — регулятор температуры БРОУ; 7, 8 — клапаны БРОУ; 9 — стопорные клапаны турбины; 10 — регулирующие клапаны турбины; 11 — вакуум-реле

установки оснащаются защитными устройствами, предотвращающими останов блока при частичных (глубоких) сбросах электрической нагрузки.

Решение этой задачи например, для моноблока 200 МВт приводит к необходимости установки БРОУ в обвод ЦВД и ЦНД, сбрасывающих избыточный пар в конденсатор (рис. 15.12). БРОУ включается при резких и глубоких сбросах электрической нагрузки блока и поддерживает давление пара перед турбиной и температуру после себя. Сигналом, включающим БРОУ-1, служит уменьшение перепада давлений ниже заданного значения на ЦВД; сигналом, включающим БРОУ-2, — уменьшение перепада давлений на вторичном перегревателе. БРОУ-2 поддерживает давление пара после промперегревателя и температуру после себя. В случае мгновенных сбросов электрической нагрузки или отказа БРОУ избыток пара должен сбрасываться в атмосферу через предохранительные клапаны. Помимо автоматически включающихся БРОУ, на рис. 15.12 показано защитное устройство от понижения вакуума в выхлопном патрубке турбины (вакуум-реле), прекращающее доступ пара в ЦВД и ЦНД при появлении этого сигнала.

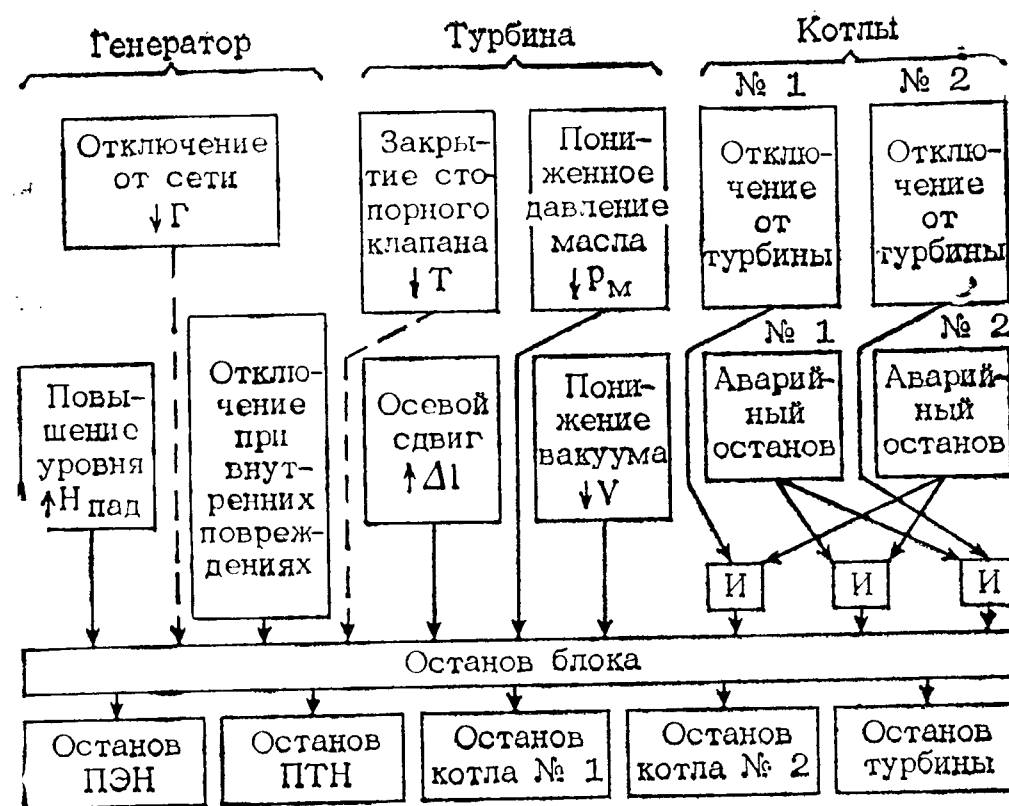


Рис. 15.13. Логическая схема действия защиты дубль-блока

Защиты дубль-блоков (два котла — одна турбина) построены по несколько иному принципу по сравнению с моноблочной установкой. Система автоматической защиты дубль-блока мощностью 300 МВт выполняет функции: останова блока, останова турбины, перевода блока в режим холостого хода, снижения нагрузки блока, останова одного из котлов или перевода его на растопочную нагрузку, защиты отдельных механизмов и устройств. Из перечисленных действий аварийный останов турбины почти не отличается от схемы действия защит, приведенной на рис. 15.9. В случае работы турбины в дубль-блоке добавляется сигнал на ее останов при одновременном останове или отключении обоих котлов, а также сигнал о срабатывании общекотловой защиты на останов.

Аварийный останов парового котла осуществляется по схеме, приведенной на рис. 14.3, 14.5. Добавляется лишь сигнал о срабатывании общекотловой защиты на останов. Аварийный останов дубль-блока под действием защит производится в соответствии со схемой, приведенной на рис. 15.13. К останову блока приводит одновременный останов двух паровых котлов или одного при отключенном втором, а также турбины и электрического генератора. В свою очередь оста-

нов этих агрегатов осуществляется их собственными защитами, выполненными в соответствии со схемами рис. 14.7, 14.8.

Помимо перечисленных сигналов, на останов блока воздействует сигнал от срабатывания защиты при повышении уровня в регенеративных ПВД до второго аварийного предела $\uparrow H_{II}$. Вторая ступень защиты ПВД необходима ввиду тяжелых последствий этой аварии в случае отказа защиты первой ступени (см. рис. 14.9).

Перевод блока в режим холостого хода осуществляется при отключениях генератора от электрической сети из-за повреждений за пределами блока (повреждения на линиях электропередачи). В этих случаях турбина и генератор остаются в работе, но нагрузка генератора ограничивается собственными нуждами блока (до 4—7 % номинальной). В режиме холостого хода блока оба котла переводятся на растопочную нагрузку (затем один из них может быть остановлен), устанавливается пониженное давление перегретого пара, отключается ПТН, автоматически включается и нагружается ПЭН (см. рис. 15.10) и отключаются регуляторы производительности этих насосов. Срабатывание защиты на перевод блока и режим холостого хода в случае необходимости может быть заменено воздействием на автоматический аварийный останов блока (рис. 15.13) путем предварительного ручного переключения каналов воздействий.

Снижение нагрузки блока автоматическими устройствами производится в случаях аварийного останова одного из паровых котлов, если второй остается в работе, а также при отключении ПТН и автоматическом включении резервного ПЭН (с выдержкой времени до 10 с). В первом случае автоматическая защита включает регулятор давления перегретого пара «до себя» (см. рис. 15.3, вариант а), с пониженным заданием (на 0,3—0,4 МПа меньше номинального). Последний приводит в соответствие нагрузку турбины с паровой нагрузкой оставшегося парового котла.

При отключении ПТН и включении ПЭН нагрузка парового котла снижается до значения, соответствующего производительности ПЭН, путем уменьшения подачи топлива [13].

Контрольные вопросы

1. Поясните понятие приемистости блочной установки.
2. Поясните по рис. 15.3 варианты схем регулирования мощности энергоблока в базовом и регулирующем режимах.
3. Какие непрерывные процессы прямоточных паровых котлов автоматизируются при пусках?
4. Назовите АСР пусковых режимов барабанного парового котла.
5. Поясните действие автоматических защит моноблока (см. рис. 15.11).
6. Поясните логическую схему действия защит дубль-блока (см. рис. 15.13).

Глава шестнадцатая

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

16.1. ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

Дальнейшее развитие и наращивание единичной мощности блочных установок (сооружение турбогенераторов мощностью до 800—1200 МВт и паровых котлов до 2500—4000 т/ч) требует в целях облегчения управления разделять энергоблок и его вспомогательные установки на группы по функциональному признаку¹.

Функциональная группа (ФГ) представляет собой часть основного оборудования, выполняющего вполне определенную функцию. Например, по паровому котлу выделяются: ФГ подачи и сжигания топлива, перегрева пара, подачи и подогрева воздуха, питания котла водой и др.; по турбине — ФГ маслоснабжения турбины, конденсатных насосов и регенеративных ПНД, регенеративных ПВД и др.; по генератору — ФГ охлаждения генератора, возбуждения генератора и др. ФГ в свою очередь может быть разделена на несколько подгрупп (ФПГ). В подгруппу, как правило, входит один из однотипных агрегатов, входящих в ФГ. Управление в подгруппе осуществляется по определенной программе путем выполнения последовательности отдельных операций. Например, для подгруппы пуска ПЭН последовательность операций (шагов) показана на рис. 13.9.

Управление технологическим процессом ТЭС в целом осуществляется оператором с единого группового или блочного щита управления. Задачи, выполняемые человеком-оператором, существенно усложняются в связи с увеличением объема информации о состоянии оборудования и количества операций по управлению. Автоматические устройства контроля, регулирования и управления позволяют разгрузить оператора от выполнения многочисленных однообразных действий по наблюдению за состоянием оборудования и управлению и сосредоточить его внимание на главных параметрах и операциях. В число таких автоматических устройств входят подсистемы непрерывного и дискретного (логического) управления, защиты, сигнали-

¹ Разработка и внедрение ВТИ им. Ф. Э. Дзержинского, института Теплоэлектропроект и Союзтехэнерго.

зации и расчета ТЭП. Структура организации управления технологическими процессами с помощью перечисленных подсистем изображена на рис. 16.1.

Приборы непрерывного измерения 1 контролируют наиболее важные технологические параметры. В качестве непрерывно действующих измерительных устройств используются стрелочные приборы. Некоторые из них снабжаются устройствами регистрации (например, расходов пара и воды парового котла и др.) для наблюдения за изменением (уменьшением или увеличением) контролируемой величины в каждый момент времени и качеством работы систем управления отдельными участками. Кроме того, с помощью записывающих приборов можно анализировать причины возникновения и ход развития аварий и оценивать экономичность установки в течение длительных периодов времени.

Измерения по вызову 2 необходимы для периодического контроля менее ответственных параметров (например, температуры и разрежения по газовому тракту паровых котлов, температуры и уровня пыли в промбункерах и др.). Контроль по вызову осуществляется путем подключения к одному показывающему прибору через переключатель измерительных цепей от группы первичных приборов. Простейшими измерительными устройствами, осуществляющими принцип контроля по вызову, служат стрелочные приборы с многоточечными переключателями.

Назначение устройства сигнализации 3 состоит в том, чтобы в момент превышения параметром допустимого отклонения от заданного значения четко информировать оператора о случившемся. Информация передается путем зажигания постоянного или мигающего светового табло с соответствующей надписью и сопровождается звуковым сигналом.

Массовый (множественный) контроль 4 применяется при необходимости измерения большого количества однотипных параметров при малой вероятности отклонения их от заданного значения (например, температуры подшипников вращающихся механизмов, металла турбины и др.). Для массовых измерений применяются автоматические измерительные системы, снабженные обегаящими устройствами и связанные с системой сигнализации.

Расчет технико-экономических показателей (ТЭП) (на рис. 16.1 не показан) на крупных установках целесообразно проводить на электронных цифровых вычислительных машинах (ЭЦВМ), снабженных печатающими устройствами

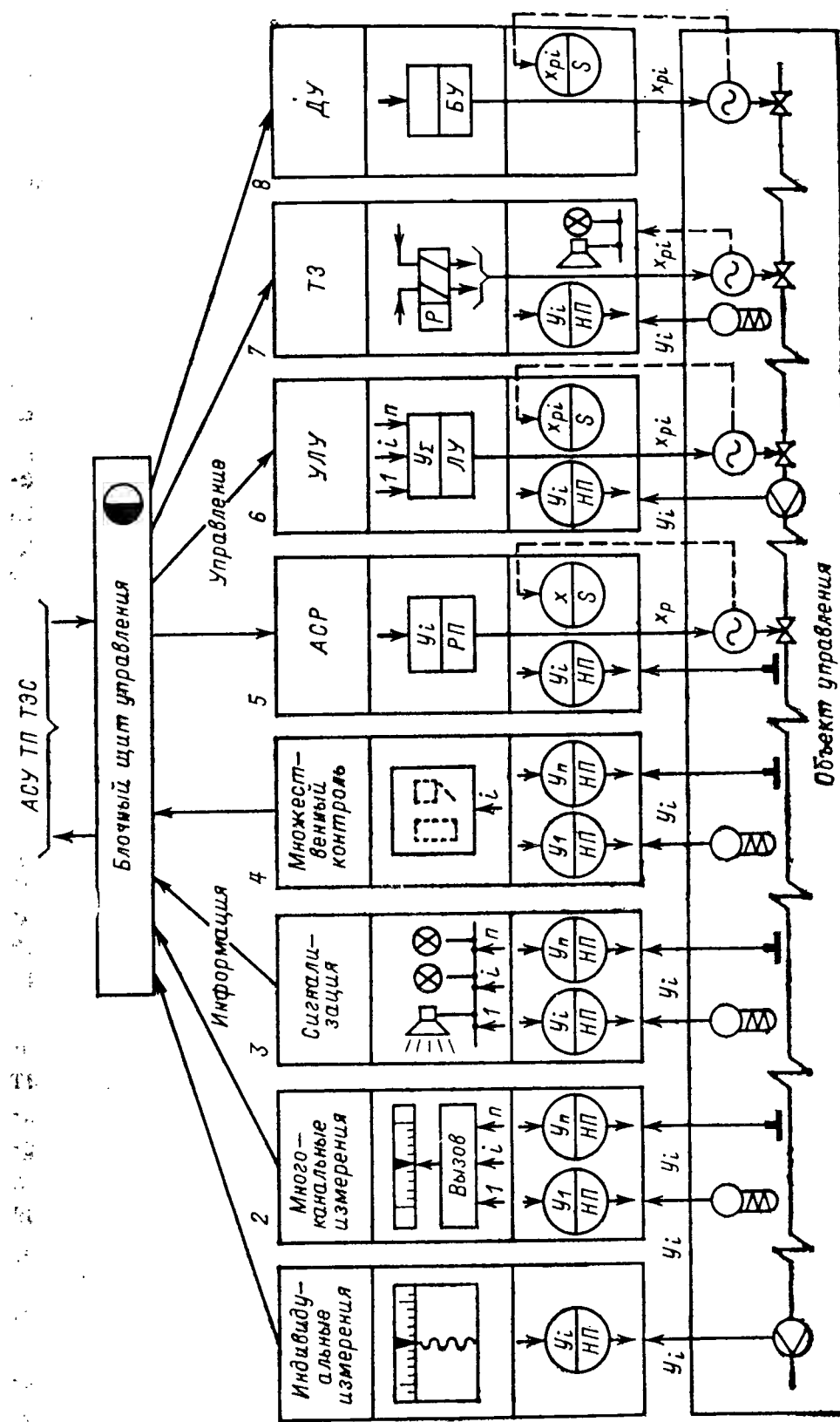


Рис. 16.1. Система управления группой теплоэнергетических объектов (структурная схема): КУ — ключ управления; ИС — индикатор состояния (включено—отключено), (открыто—закрыто); ИМ — исполнительный механизм; ЦП — цифровой прибор; ПМ — печатающая машинка

непрерывного и периодического действия. Машинная система учета ТЭП может быть использована в качестве «советчика» оператора в процессе управления.

Устройства непрерывного автоматического регулирования 5 должны стабилизировать технологические параметры на заданном значении, поддерживать заданную производительность (мощность) и обеспечивать надежную и экономичную работу установки.

Автоматическое дискретное (логическое) управление 6 предусматривает одновременное управление несколькими исполнительными механизмами от одной команды (сигнала) или же воздействие на группу функционально связанных механизмов с дальнейшим автоматическим развитием команды по определенной программе. Например, управление пуском конденсатного электронасоса (КЭН) предусматривает проведение элементарных операций в следующей последовательности: открытие запорной задвижки на всасе — пуск электропривода — открытие запорной задвижки на напорной линии. Перечисленные операции могут быть сведены к одной (нажатию кнопки пуска КЭН) с последующим автоматическим развитием команды по требуемой программе.

Устройства тепловой защиты 7 призваны предотвращать возникновение и развитие аварий и защищать теплоэнергетические установки от повреждений и разрушений в случае отказов или ложных действий систем регулирования и при ошибочных действиях оператора. Системы защиты выполняются независимыми от других систем: имеют собственные первичные устройства для измерения и датчики контролируемых технологических параметров, независимые каналы управляющих воздействий, а также собственные автоматические резервируемые источники питания.

Назначение устройств *дистанционного управления 8*, помимо замены тяжелого физического труда человека, состоит в передаче воздействий оператора на регулирующие и запорные органы, пусковые и отключающие устройства механизмов, удаленных от поста управления. На крупных блочных ТЭС наибольшее развитие получили системы управления по вызову, которые работают в две стадии: выбор объекта управления с помощью клавишного аппарата и подача командного сигнала на исполнительный механизм ключом, общим для группы (см. рис. 13.4).

Показывающие и регистрирующие измерительные приборы, ключи и переключатели управления, указатели положения регулирующих органов всех перечисленных выше

систем размещаются на блочных или групповых щитах управления (БЩУ и ГрЩУ), которые устанавливаются в специально отведенных для них помещениях и обслуживаются оператором. Щит управления представляет собой сооружение из пультов и панелей, на которых размещается вся контрольно-измерительная и пускорегулирующая аппаратура теплоэнергетической установки или группы установок. Однако часть второстепенных технологических параметров контролируется с помощью приборов, установленных на так называемых местных щитах управления (МЩУ), расположенных вблизи действующих агрегатов (например, щиты питательно-деаэрационных и редуционно-охлаждающих установок, щиты манометров турбогенераторов или щиты U-образных манометров давления первичного и вторичного воздуха перед горелками парового котла и др. [16]). Наблюдение за состоянием действующего оборудования и показаниями приборов на местных щитах управления, а также необходимые ручные воздействия на регулирующие или запорные органы осуществляются дежурными обходчиками. Связь между обходчиками, обслуживающими местные щиты управления, операторами центральных щитов и дежурным инженером станции осуществляется по радио и телефону.

Использование систем контроля и управления по вызову, систем массовых измерений и применение первичных приборов с унифицированным выходным сигналом (электрическим или пневматическим), пригодным для многократного использования, позволяет сократить общее количество измерительных приборов, существенно уменьшить размер щитов управления.

При организации БЩУ большое внимание уделяется созданию благоприятных условий для работы оператора, облегчению процессов восприятия и осмысливания получаемой им информации с целью выполнения управляющих воздействий. В связи с этим непосредственно в поле зрения оператора располагают только те приборы и аппаратуру, которые постоянно необходимы для управления блоком. Эти приборы и аппараты образуют *оперативный контур* БЩУ, выполняемый в виде вертикальных приборных панелей и противостоящих им пультов управления. На панелях *неоперативного контура* БЩУ устанавливаются измерительные приборы вспомогательного назначения (обычно приборы массового контроля или контроля по вызову), регулирующие приборы, коммутационная и вспомогательная аппаратура.

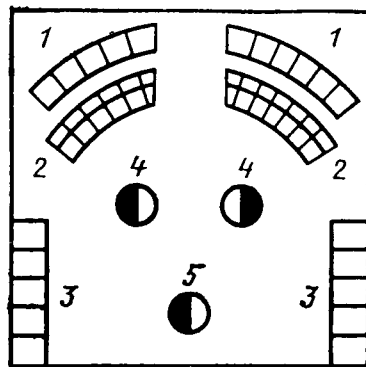


Рис. 16.2. Компонировка блочного щита управления (на два блока):

1 — оперативные панели щитов; 2 — оперативные панели пультов; 3 — неоперативные панели щитов; 4 — оператор блока; 5 — старший оператор (начальник смены)

Пример компоновки БЩУ в плане для двух энергоблоков приведен на рис. 16.2.

Центром диспетчерского управления ТЭС в целом служит главный щит ГЩУ, оснащенный УВК, который служит верхней ступенью управления АСУ ТП ТЭС, куда поступает наиболее важная информация от подчиненных систем управления энергоблоками — блочных вычислительных систем БВС. Центром диспетчерского управления объединения ТЭС, образующих энергосистему ЭС, служит районное диспетчерское управление РДУ, также оснащенное двух- или трехмашинным УВК, куда стекается обобщенная информация от ТЭС. Объединение энергосистем ОЭС управляется из собственного центра — объединенного диспетчерского управления ОДУ, в составе которого функционирует «свой» УВК. Наконец, все ОЭС управляются центральным диспетчерским управлением ЦДУ, оснащенный главным многомашинным УВК (ГУВК), решающим задачи по оптимальному управлению процессами выработки и распределения электроэнергии в масштабе всей страны. Таким образом, управление ОЭС, ЭС, ТЭС и энергоблоками является многоступенчатым (иерархически построенным) и осуществляется единой автоматизированной системой диспетчерского управления АСДУ, фрагмент организационной структуры которой показан на рис. 16.3.

Функционирование отдельных УВК, входящих в АСДУ, осуществляется с учетом перспективы создания отраслевой АСУ производством и распределением электрической энергии в пределах всей страны ОАСУ «Энергия» [13].

16.2. НАЗНАЧЕНИЕ И СОСТАВ ФУНКЦИЙ АСУ ТП ПО ЭНЕРГОБЛОКУ

В связи с переходом на блочную компоновку энергооборудования резко возросло количество одновременно контролируемых параметров (до 2000—3000), усложнились

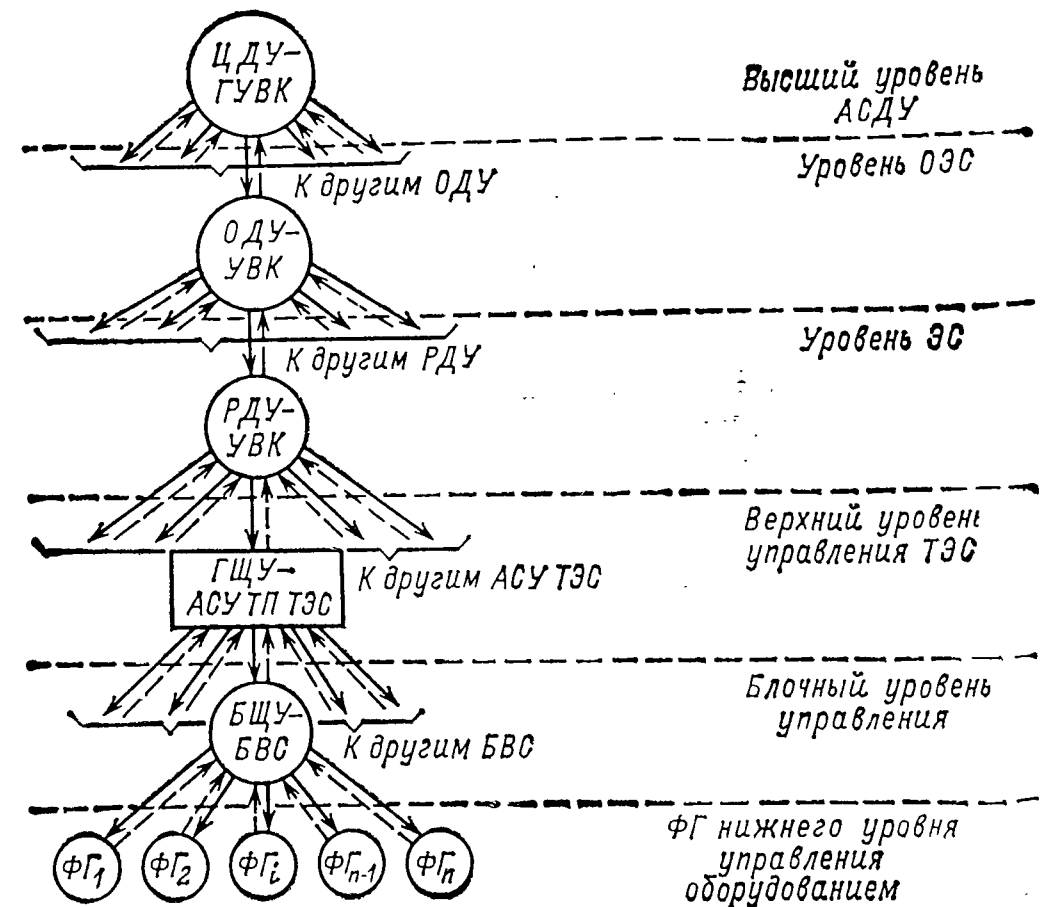


Рис. 16.3. Организационная структура автоматизированной системы диспетчерского управления (АСДУ)

формы отчетности перед вышестоящими центрами управления, повысились роль и ответственность индивидуальных измерений по важнейшим параметрам. Появилась необходимость коренным образом изменить управление на основе единства технологического процесса в энергоблоках. Потребовалось, используя комплекс технических средств и ЭВМ, освободить оперативный персонал от многочисленных, но второстепенных операций по контролю и регулированию с тем, чтобы сосредоточить его внимание на решении главной задачи управления — выполнении заданного графика нагрузки при минимуме энергетических потерь. Достижение главной цели управления обеспечивается внедрением на ТЭС единой автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП ТЭС), предназначенной для выработки и реализации управляющих воздействий в соответствии с принятыми критериями управления [22, 25].

Основное преимущество АСУ ТП перед совокупностью автономных систем отдельных агрегатов состоит в том, что она позволяет управлять технологическими процессами ТЭС в целом, а не по частям. Другое преимущество АСУ заключается в надлежащем выполнении операций по останову и пуску блочного оборудования из различных тепловых состояний. Кроме того, сама АСУ может использовать как инструмент по изучению технологического процесса и оборудования, например для определения математических моделей статики и динамики ТООУ и вычисления фактических или нормативных значений ТЭП. Отмеченные преимущества достигаются за счет существенного расширения состава функций АСУ ТП на крупных энергоблоках по сравнению с автономными системами управления доблочной энергетикой.

Информационные функции АСУ ТП по энергоблокам:

1. *Оперативный контроль технологических параметров.* С целью получения информации о ходе технологического процесса предусматриваются: индивидуальный контроль минимального числа наиболее важных технологических параметров с помощью постоянно включенных показывающих или регистрирующих приборов; избирательный контроль, а также множественный контроль (контроль по вызову на аналоговых и цифровых приборах или электронно-лучевых трубках, графическая регистрация на аналоговых приборах и т. п.).

2. *Технологическая сигнализация.* В качестве дополнительной информации предусматриваются световая и звуковая сигнализация технологических параметров, вышедших за пределы установленных значений, а также сигнализация состояния регулирующих и запорных органов и оборудования. Световая сигнализация является одной из форм множественного контроля и осуществляется на световых табло, встроенных в мнемосхемы ТООУ.

3. *Расчет технико-экономических показателей.* С целью сопоставления достигнутых показателей качества технологических процессов с заданными критериями управления предусматривается автоматизированный расчет ТЭП по отдельным агрегатам и по блоку в целом в соответствии с существующими нормами отчетности [26]. Расчеты ведутся в темпе с технологическим процессом на основе непрерывной информации о технологических параметрах. Однако в целях получения представительных результатов значения оперативных интервалов расчета КПД устанавливаются равными не менее 15 мин. Кроме того, значения

ТЭП вычисляются в соответствии с интервалами существующих форм отчетности: за смену (8 ч), сутки, месяц, год.

4. *Определение достоверности информации.* С целью проверки точности функционирования информационных подсистем предусматривается дополнительный контроль численных значений технологических параметров по важнейшим каналам измерений. Проверка осуществляется сравнением с показаниями дублирующих измерительных систем и приборов или со значениями параметров, полученными на основе косвенных вычислений с помощью ИВК.

5. *Регистрация аварийных положений.* С целью обобщения опыта эксплуатации энергоблоков, выявления экономического ущерба от аварий и предупреждения ошибочных действий оперативного персонала предусматривается регистрация событий и технологических параметров в аварийных (предаварийных) режимах работы энергооборудования (внезапный сброс электрической нагрузки, непредвиденный останов одного или группы агрегатов и т. п.). В случае необходимости персоналу представляется информация для анализа причин возникновения и характера развития аварий. Для этого в памяти УВК хранится информация о событиях и значениях технологических параметров в течение заданного промежутка времени T_1 , начиная от момента последнего опроса. В каждом новом цикле представления данных «стирается» информация, вышедшая за пределы интервала T_1 , и вместо нее заносятся вновь полученные сведения. При этом обеспечивается регистрация: событий, численных значений важнейших технологических параметров, последовательности и времени срабатывания технологических защит, а также положений всех контролируемых регулирующих и запорных органов на момент аварий.

Функции управления АСУ ТП по энергоблоку:

1. *Статическая оптимизация режимов работы энергооборудования.* С целью достижения заданных критериев управления предусматривается контроль и управление режимами работы оборудования.

По котлу — поддержание КПД брутто вблизи оптимального значения путем сравнения его текущего и расчетного значений. Регулирующим воздействием служит изменение расхода воздуха, подаваемого в топку, например, за счет изменения положения направляющих аппаратов на всасываемых вентиляторов или использования других способов (см. § 10.2, 10.4).

По турбине — поддержание КПД нетто турбоустановки вблизи оптимального значения за счет изменения вакуума

в конденсаторе. Регулирующим воздействием служит изменение расхода охлаждающей воды в конденсатор. Изменение подачи циркуляционных насосов достигается, например, путем изменения положения лопаточного аппарата.

По блоку в целом — поддержание давления перегретого пара перед турбиной, которое может изменяться в заданных пределах в зависимости от нагрузки в регулирующем режиме работы блока. Изменение давления пара может достигаться, например (при работе на скользящих параметрах), путем воздействия на расход топлива, подаваемого в топку котла.

2. *Динамическая оптимизация технологических процессов.* С целью достижения заданных показателей качества переходных процессов предусматривается коррекция динамических параметров настройки регуляторов нижнего уровня (см. § 5.3; 5.4; 5.5), коррекция (подстройка) осуществляется при изменениях режимов работы энергоблока (например, при переходе с одного уровня нагрузки на другой) или условий его эксплуатации (изменение вида и характеристик топлива или состава работающего оборудования). Подстройка может осуществляться дистанционно оператором с помощью приспособлений, имеющих на пульте управления и на регуляторах, или автоматически с помощью УВК (см. § 8.1).

3. *Переключения и дискретные операции.* С целью достижения заданных критериев управления при переходе с одного уровня электрической или тепловой нагрузки на другой или в случае изменения состава работающего оборудования предусматриваются переключения в тепловой или электрической схеме энергоблока. Переключения осуществляются дистанционно или техническими средствами дискретной автоматики (устройства логического управления нижнего уровня или дискретных автоматов). В состав операций переключения входят: открытие или закрытие запорных органов в обусловленной последовательности или же включение (отключение), пуск (останов) вспомогательных агрегатов (резервных, пусковых, дополнительных и т. п.).

Необходимость в автоматических переключениях и дискретных операциях больше всего возникает в пусковых, аварийных или переменных режимах работы оборудования, наиболее тяжелых с точки зрения оперативной загрузки персонала.

16.3. ОБЩЕСТАНЦИОННЫЕ ФУНКЦИИ АСУ ТП ПО КОНТРОЛЮ И УПРАВЛЕНИЮ

Информационные функции АСУ ТП ТЭС:

1. *Общестанционный контроль технологических параметров и состояния оборудования.* С целью представления информации операторам (дежурному инженеру ТЭС) о ходе технологического процесса и достижения заданных значений технико-экономических показателей ТЭС предусматривается сбор и переработка информации о состоянии и режиме работы общестанционного технологического оборудования.

2. *Расчет общестанционных ТЭП.* Осуществляется с различными интервалами времени в зависимости от принятой в энергосистеме отчетности. Полученная информация представляется лицам, принимающим решения по управлению ТЭС: дежурному инженеру, начальникам смен (старшим операторам энергоблоков) и руководству ТЭС.

3. *Контроль достоверности информации общестанционного назначения.* Осуществляется параллельно с расчетом ТЭП ТЭС и отдельных энергоблоков.

4. *Регистрация общестанционных аварий.* С целью обобщения опыта эксплуатации и последующего анализа аварийных ситуаций предусматривается, начиная с момента возникновения аварии, автоматическая регистрация обобщенных показателей ТЭС и технологических параметров, характеризующих состояние оборудования общестанционного назначения.

5. *Обмен оперативно-диспетчерской информации с АСУ вышестоящих и нижестоящих уровней.* Обмен информацией происходит непрерывно по важнейшим каналам управления и измерений и периодически по второстепенным каналам.

Функции управления АСУ ТП по ТЭС:

1) оптимальное распределение нагрузок между энергоблоками с помощью УВК общестанционного назначения;

2) выбор состава работающего оборудования энергоблоков в зависимости от заданного графика электрической нагрузки ТЭС с учетом останова и длительности простоев части оборудования и затрат топлива и электроэнергии на его последующий пуск;

3) дискретное и непрерывно-дискретное управление вспомогательным оборудованием, образующим функциональные группы и подгруппы общешлюзового и общестанционного назначения (РОУ или БРОУ, установки химиче-

ской подготовки воды, системы топливо — подачи, централизованного циркуляционного водоснабжения и др.).

Приведенный выше перечень информационных и управляющих функций АСУ ТП по энергоблоку и ТЭС может дополняться, развиваться или изменяться в каждом конкретном случае в зависимости от задач эксплуатации и по мере развития вычислительных возможностей УВК.

16.4. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА АСУ ТП

Укрупненная функциональная структура АСУ ТП ТЭС, реализуемая с помощью комплекса технических средств (КТС), изображена на рис. 16.4. Основу автоматизированной системы составляют три ее части: информационная, управляющая и исполнительная. Они же образуют одноименные подсистемы. Назначение первой из них — сбор, обработка и представление оператору информации, поступающей с ТОУ; второй, в которой немаловажная роль отводится ЭВМ, — выработка управляющих воздействий, направленных на достижение заданных критериев управления. Третья — исполнительная часть — предназначена для реализации управляющих воздействий на ТОУ с помощью регулирующих и запорных органов и электроприводов вспомо-

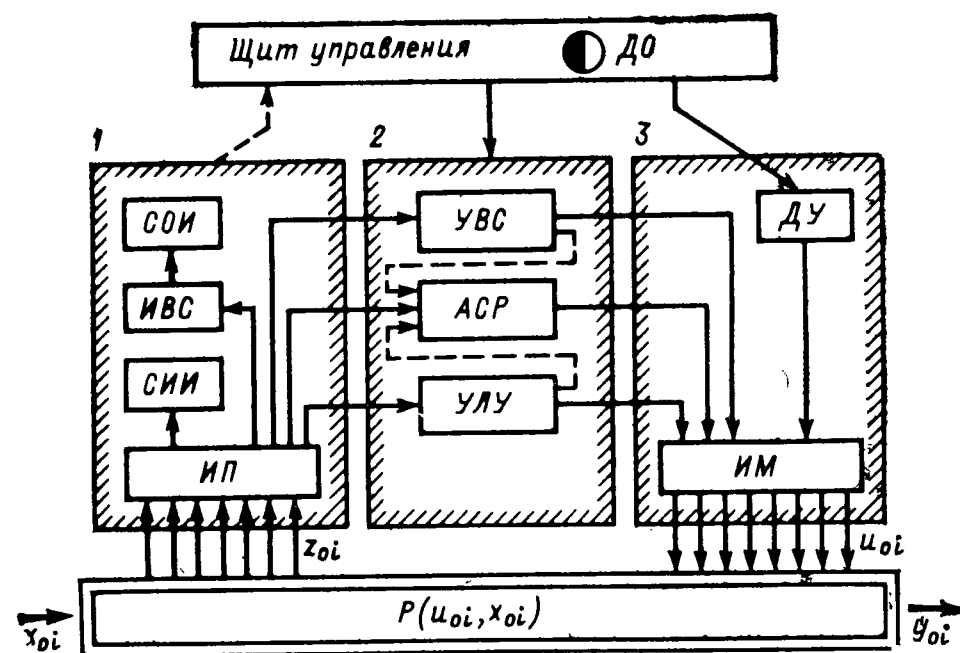


Рис. 16.4. Функциональная схема АСУ ТП:

1 — информационная часть; 2 — управляющая часть; 3 — исполнительная часть; СИИ — средства индивидуального измерения; ИП — измерительные преобразователи; СОИ — средства отображения информации; ИВС — информационно-вычислительная подсистема; УВС — управляющая вычислительная подсистема; ДО — дежурный оператор

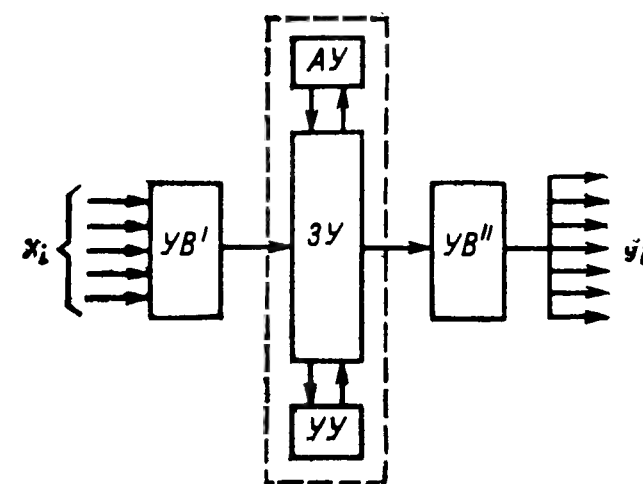


Рис. 16.5. Функциональная схема ЭВМ

гательных механизмов и машин. АСУ ТП ТЭС отличается от традиционных систем управления наличием управляющего вычислительного комплекса (УВК). Его образуют совокупность технических средств и элементов, предназначенных для выработки и реализации управляющих воздействий или выдачи рекомендаций по управлению технологическими процессами [24, 25].

Центральной частью УВК является ЭВМ. Она состоит из пяти основных элементов (рис. 16.5):

1) запоминающего устройства ЗУ, служащего местом хранения данных, используемых при вычислении команд, выполнение которых определяет функции вычислительной машины в системе управления;

2) арифметического устройства АУ, выполняющего вычислительные операции (сложение, вычитание, умножение, деление и сравнение);

3) устройства ввода УВ', служащего для введения в ЗУ программ и данных, обрабатываемых вычислительной системой (численных значений констант, измеряемых технологических параметров, коэффициентов и др.);

4) устройства вывода УВ'', обеспечивающего появление на выходе ЗУ результатов вычислений, принимаемых для непосредственного управления (численных значений сигналов управляющих воздействий) или для рекомендаций оператору;

5) устройства управления УУ, подающего в определенном порядке команды на выполнение вычислительных функций, направленных на принятие ЭВМ логических решений и арифметических операций.

Арифметическое и запоминающее устройства (сверхоперативная память) и устройство управления образуют центральный процессор. Для решения задач управления технологическим процессом централь-

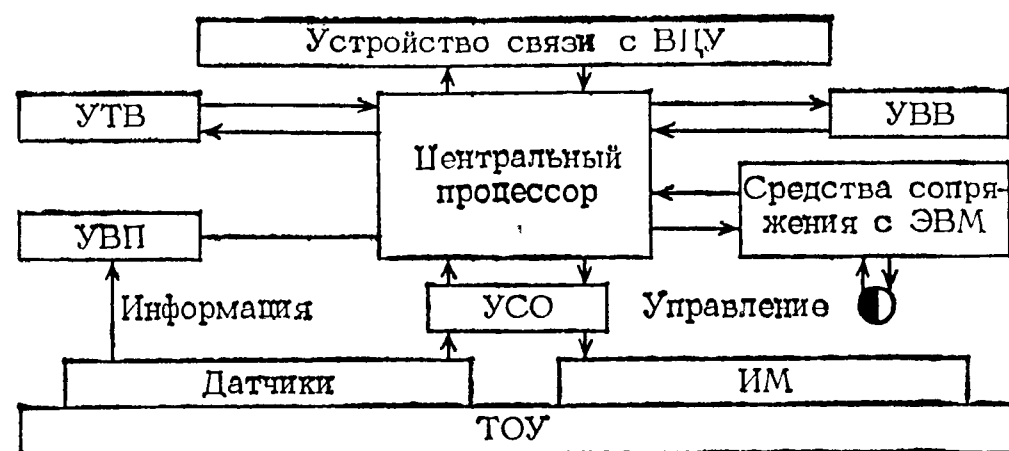


Рис. 16.6. Функциональная схема УВК

ный процессор должен быть оснащен пятью дополнительными функциональными устройствами (рис. 16.6).

1. Устройство текущего времени *УТВ* (электронные часы). Время вводится в программы, реализуемые в АСУ ТП, как параметр. Главное назначение устройства отсчета времени — расписание и учет событий, сопровождающий любой процесс в течение рабочего дня (смены); подача управляющих воздействий в определенные моменты времени после выявления тех или иных случайных или запланированных событий.

2. Устройство внешнего прерывания *УВП*. УВК АСУ ТП должен реагировать на непредвиденные события или аварии оборудования путем прерывания выполнения текущей программы. Дело в том, что некоторые события более важны, чем другие, т. е. обладают относительным приоритетом. Устройство прерывания при появлении сигналов более высоким приоритетом, например сигналов от противоаварийной автоматики, имеющих абсолютный приоритет, останавливает обработку процессором менее важной задачи, имеющей низший приоритет. После завершения программы обслуживания, связанного с высокоприоритетным прерыванием, процессор возвращается к выполнению прерванной программы.

3. Устройство связи с объектом *УСО* совместно с устройством ввода—вывода *УВВ* служит для связи с внешней средой (процессом) в реальном масштабе времени. УВК АСУ ТП воспринимает информацию в виде аналоговых и цифровых сигналов. Для этого существуют аналого-цифровые преобразователи (АЦП), подключаемые к множеству первичных измерительных преобразователей с помощью устройства обегания (входного коммутатора). Для восприятия дискретных сигналов типа «да—нет» или в виде последовательности импульсов существует отдельный цифровой вход.

Большинство ЭВМ имеет два вида сигналов управляющих воздействий: *аналоговый и цифровой*. Переход от цифрового значения сиг-

нала к аналоговому осуществляется с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП).

В случае если приводом исполнительного механизма служит шаговый двигатель, для его управления вырабатывается сигнал в виде последовательности прямоугольных импульсов по напряжению.

4. Устройство сопряжения человека с машиной. Любая АСУ — человекомашина система. Оператор должен иметь возможность «общаться» с ЭВМ. Чаще всего эта связь осуществляется с пульта управления технологическим процессом, например с пульта ГЩУ, БЩУ или ГрЩУ. Средствами связи служат: экранный дисплей, на котором высвечиваются результаты вычислений или советы оператору по управлению, нажимные клавиши со специальной маркировкой для подачи команд по выполнению определенных функций, соответствующих конкретному объекту управления; клавиши цифрового ввода новых значений технологических параметров или изменения численных значений, введенных ранее. После нажатия той или иной клавиши с помощью соответствующих элементов ЭВМ совершается определенное действие по управлению оборудованием или расчету ТЭП.

5. Устройство связи с вышестоящим центром управления (ВЦУ) служит для осуществления диалога между двумя машинами, находящимися на разных уровнях управления. Кроме того, УВК соединены между собой устройствами телетайпной связи. Во время сеанса связи подсистема управления низшего уровня должна быть готова к прерыванию своей задачи через устройство внешнего прерывания при появлении команды (сигнала) от системы управления, обладающей приоритетом.

16.5. РЕАЛИЗАЦИЯ АСУ ТП ТЭС

На электростанциях, оснащенных АСУ ТП, уверенное управление энергоблоком одним-двумя операторами в настоящее время стало реальностью. На проектируемых и вновь строящихся крупных ТЭС управление базируется только на АСУ ТП, имеющем в своем составе УВК. Однако оснащение системы управления технологическим процессом ТЭС комплексом технических средств является необходимым, но не достаточным условием функционирования АСУ ТП.

При внедрении АСУ ТП ТЭС в эксплуатацию предусматриваются:

информационное обеспечение, образуемое совокупностью системы классификации и кодирования технологической и технико-экономической информации, сигналов, характеризующих состояние ТЭС и отдельных энергоблоков, масси-

вов данных и документов, необходимых для выполнения всех функций АСУ ТП ТЭС;

организационное обеспечение, реализуемое наличием совокупности описаний функциональной (см. рис. 16.4), технической (см. рис. 16.5; 16.6) организационной (см. рис. 16.3) структур, инструкций и регламентов для оперативного персонала, обеспечивающих заданное функционирование автоматизируемого технологического оборудования;

математическое обеспечение, образуемое наличием совокупности математических методов, моделей и алгоритмов для решения задач управления и обработки информации с применением вычислительной техники;

программное обеспечение, образуемое наличием совокупности программ по реализации всех функций АСУ ТП и предполагаемому развитию системы в направлении расширения состава функций;

пакет прикладных программ, являющихся частью программного обеспечения и представляющих собой совокупность программ, реализующих группу однородных функций и программу их настройки для конкретных объектов ТЭС (котлов, турбин или блоков в целом).

Автоматическая система управления ТП ТЭС является подсистемой и продолжением большой системы управления — АСУ ЭС (см. рис. 16.3) как по количеству управляемых объектов, численности контролируемых и регулируемых величин, так и по наличию взаимосвязей между процессами. Это означает, что при ее проектировании или изучении можно применить иерархический подход, который определяет «порядок подчинения взаимосвязанных подсистем автоматизированной системы управления технологическим процессом» [5].

Рассмотрим пример реализации АСУ ТП ТЭС, построенной по иерархическому принципу на основе разделения функций по контролю и управлению [22]. Функции контроля и управления для трех энергоблоков ТЭС мощностью 800 МВт каждый разделены на три группы (рис. 16.7).

1. *Сбор информации от датчиков*, установленных на ТОО; контроль аналоговых и дискретных величин; обнаружение отклонения значений регулируемых величин с их сигнализацией и регистрацией. Общий объем информации такого вида составляет около 1000 величин. Для решения этой задачи используются разнообразные технические средства отображения информации (СОИ) и различные способы ее кодирования. Под кодированием понимают преобразование зрительной информации в сигнал, удобный для

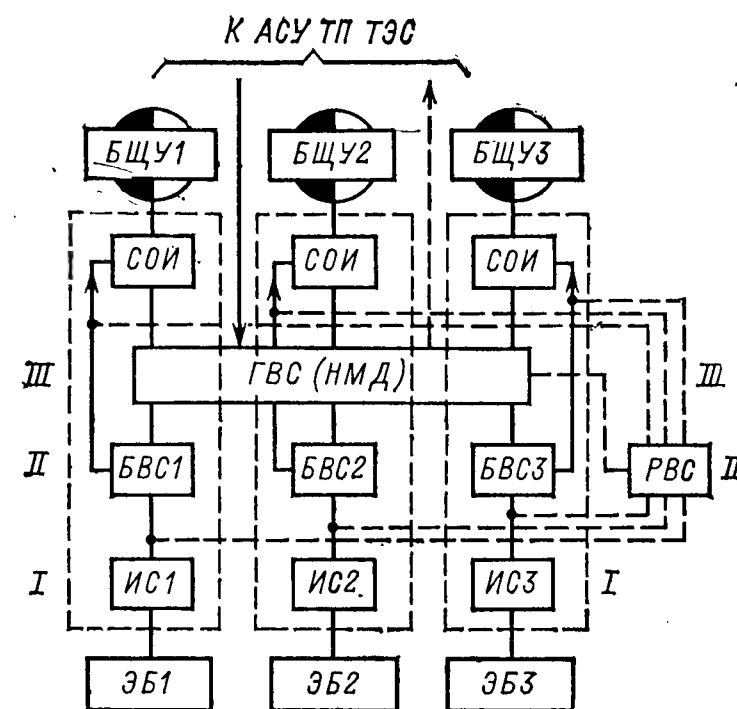


Рис. 16.7. Функциональная схема реализации АСУ ТП ТЭС для трех энергоблоков:

I, II, III — уровни управления; *ИС* — информационная подсистема по каждому энергоблоку; *БВС* — общеклассовая вычислительная подсистема; *ГВС* — групповая общестанционная вычислительная система; *РВС* — резервная вычислительная подсистема; *СОИ* — средства отображения информации по энергоблоку

передачи информации по выбранному каналу связи. Большинство сигналов передается с помощью условных символов: цифр, букв, геометрических фигур и различных категорий (красного, желтого, зеленого).

Выбор кода зависит от вида решаемых задач по контролю и управлению. Так, например, в задачах опознания объектов наибольшей эффективностью с точки зрения скорости обнаружения информационных сигналов обладают категории *цвета*. В задачах управления, связанных с запоминанием информации, наибольшей эффективностью обладают *цифровой* и *буквенный* коды. При выборе кода учитываются также привычные для человека-оператора взаимные связи между явлениями и событиями (ассоциации). Например, размеры символов и их яркость всегда ассоциируются с важностью объекта (параметра); красный цвет — с опасностью, желтый — с предупреждением, зеленый — со спокойной обстановкой.

2. *Оперативная обработка информации*, предназначенной для управления и накопления данных, используемых при составлении отчетности. В нее входят: расчет и анализ ТЭП на оперативных материалах, оптимизация режимов работы оборудования, подготовка данных

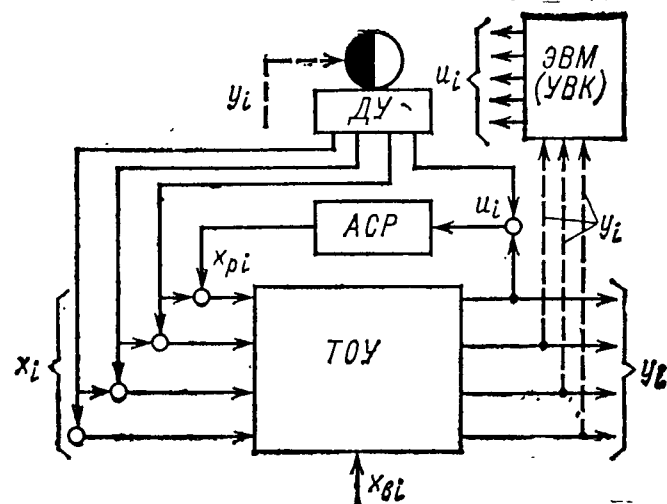


Рис. 16.8. Управление в режиме советчика оператора

для контроля состояния оборудования при пуске и испытаниях, регистрация аварийных состояний.

Оптимизация режимов работы оборудования осуществляется с помощью блочной вычислительной системы (БВС), используемой как «советчик» оператора. Сигналы измерительной информации $\{y_i\}$, поступающие с объекта, преобразуются в цифроаналоговом преобразователе ЭЦВМ в цифровую форму (код). Поступив в ЭЦВМ, они используются в качестве исходных данных в алгоритмах расчета задающих и регулирующих воздействий u_i . Последние представляются оператору в цифровой форме и регистрируются в случае необходимости. Оператор, руководствуясь ими, управляет процессом путем изменения задания АСР или с помощью систем дистанционного управления регулирующими органами. Преимущество этого вида управления в том, что БВС постоянно «помогает» оператору в его стремлении оптимизировать технологический процесс. Недостаток — в ограниченном числе управляющих воздействий, которые может реализовать оператор в единицу времени. Например, в переменных или пусковых режимах оператор может не успеть вовремя выполнить все рекомендации ЭВМ, изменяющиеся довольно часто, и управление в режиме советчика потеряет смысл. Следовательно, использование БВС в режиме «советчика» облегчает работу оператора только в базовом режиме эксплуатации.

Существенное расширение возможностей БВС достигается в режиме *супервизорного* (надзорного) управления (рис. 16.9). БВС периодически подключается к автоматическим системам непрерывного регулирования и осуществляет «надзор» за их работой. С точки зрения управления технологическими объектами наибольший практический интерес представляют два варианта этого режима: автоматическая коррекция заданных значений регулируемой величины (см. рис. 16.9, а)

и автоматическая подстройка динамических параметров настройки АСР нижнего уровня (см. рис. 16.9, б). В первом случае БВС используется для решения задач статической оптимизации объектов управления, во втором — динамической.

Так, статическая оптимизация режима горения в топке котла осуществляется путем воздействия БВС на задатчик регулятора подачи общего воздуха по сигналу изменения КПД, определяемому в темпе с технологическим процессом через каждые 15 мин [22].

Динамическая оптимизация параметров настройки регуляторов осуществляется при глубоких изменениях нагрузки установок путем подачи корректирующих сигналов, вычисленных БВС, по каналам K_p и T_n в случае ПИ-регулятора (см. рис. 8.4).

Непременным условием реализации супервизорного управления служит оснащение АСР нижнего уровня регулирующими приборами, снабженными устройствами дистанционного воздействия на органы настройки, например, аппаратурой Каскад 2 или АКЭСР (см. § 7.4, 8.3).

3. *Операции по расчету и анализу ТЭП* на отчетных интервалах (смена, сутки, неделя, месяц), контроль за состоянием оборудования и по обработке данных тепловых испытаний (с целью составления режимных карт по энергоблокам, наладки АСР и т. п.). Информация третьей группы достаточно велика по объему, но мала по интенсивности одновременно обрабатываемых потоков. Например, периодичность решения регулярных задач составляет примерно 8 ч, эпизодических 5—15 мин. Это создает предпосылки для объединения и решения таких задач в одном вычислительном комплексе для группы однотипных энергоблоков.

Описанное выше разделение функций по контролю и управлению послужило основой реализации автоматизированной трехуровневой системы управления для трех энергоблоков, изображенной на рис. 16.7, в которой каждый уровень реализует функции одной группы.

Приведенный пример автоматизированного управления объектами крупноблочной ТЭС с помощью БВС и ГВС представляет собой лишь один из вариантов построения АСУ ТП ТЭС. На вновь строящихся станциях, а также находящихся в эксплуатации структура АСУ и состав технических средств автоматизации могут совершенствоваться

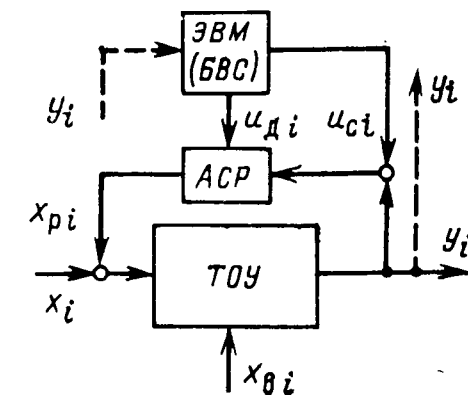


Рис. 16.9. Функциональная схема супервизорного управления

и изменяться, а выполняемые ими функции дополняться и развиваться с учетом специфических особенностей эксплуатации и состава основного энергооборудования.

Контрольные вопросы

1. В чем состоят информационные функции АСУ ТП по энергоблоку?
2. Назовите основные управляющие функции АСУ ТП ТЭС.
3. Поясните функциональную структуру АСУ ТП, пользуясь рис. 16.4.
4. В чем состоит особенность использования ЭВМ в режиме советчика оператора?
5. Поясните сущность супервизорного управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стефани Е. П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. М.: Энергия, 1972. 376 с.
2. Теория автоматического управления/Под ред. А. В. Нетушила. Ч. 1. М.: Высшая школа, 1976. 440 с.
3. Серов Е. П., Корольков Б. П. Динамика парогенераторов. М.: Энергия, 1972, 216 с.
4. Автоматизация настройки систем управления/Под ред. В. Я. Ротача. М.: Энергоатомиздат, 1984. 272 с.
5. ГОСТ 19675-74. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1976, 14 с.
6. Гальперин М. Б., Злобин Ю. П., Павленко В. А. Усилители постоянного тока. Изд. 2-е М.: Энергия, 1978. 248 с.
7. Беляев Г. Б., Кузищин В. Ф., Смирнов Н. И. Технические средства автоматизации в теплоэнергетике. М.: Энергоиздат, 1982. 320 с.
8. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации. Электрическая унифицированная система приборов автоматического регулирования «Каскад». Каталог, т. 3, вып. 4. М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1974. 56 с.
9. Гаврилов Б. П., Славин А. А., Шапиро Ю. М. Новый комплекс аппаратуры автоматического регулирования «Каскад 2». — Теплоэнергетика, 1983, № 10, с. 5—9.
10. Государственная система приборов и промышленных средств автоматизации. Агрегатированный комплекс электрических средств регулирования в микроэлектронном исполнении АКЭСР. Каталог, т. 4, вып. 3. М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1980. 120 с.
11. Всережимный комплект средств автоматического регулирования/А. И. Жирнов, В. Л. Алексеев, Ю. В. Захаров и др. Теплоэнергетика, 1981, № 10, с. 6—10.
12. Белинский С. Я., Липов Ю. М. Энергетические установки электростанций. М.: Энергия, 1974. 304 с.

13. Автоматизация крупных тепловых электростанций/Под ред. М. П. Шальмана. М.: Энергия, 1974. 240 с.
14. Благов Э. Е., Ивницкий Б. Я. Дроссельно-регулирующая арматура в энергетике. М.: Энергия, 1974. 264 с.
15. Регулирование тепловой нагрузки барабанного парового котла с использованием сигнала по тепловосприятию топочных экранов/Г. П. Плетнев, А. Н. Лесничук, А. Н. Шелихов, В. И. Ковеленов — Теплоэнергетика, 1984, № 6, с. 53—57.
16. Мурин Г. А. Теплотехнические измерения. М.: Энергия, 1979. 424 с.
17. Живилова Л. М., Ефимов Г. В., Максимов В. В. Автоматизация водоподготовительных установок тепловых электростанций. М.: Энергия, 1976. 216 с.
18. Котельные и турбинные установки энергоблоков мощностью 500 и 800 МВт/Под ред. В. В. Дорожука, В. Б. Рубина. М.: Энергия, 1979. 680 с.
19. Ястребенецкий М. А., Соляник Б. Д. Надежность промышленных автоматических систем в условиях эксплуатации. М.: Энергия, 1978. 168 с.
20. О дальнейшем развитии систем управления мощными энергоблоками/В. Д. Миронов, А. В. Наумов, М. П. Шальман и др. — Теплоэнергетика, 1978, № 8, с. 2—4.
21. Система автоматического регулирования частоты и мощности блочных ТЭС с прямоточными котлами/Н. И. Давыдов, А. Д. Меламед, М. Д. Трахтенберг, Л. П. Фотин. — Теплоэнергетика, 1979, № с. 2—7.
22. Дуэль М. А. Автоматизированные системы управления энергоблоками с использованием средств вычислительной техники. М.: Энергоатомиздат, 1983. 208 с.
23. Дементьев В. А., Байда В. А., Цейтлин Р. А. Автоматизированная система управления мощными энергоблоками (АСУ Комплекс АСВТ). — В кн.: АСУ технологическими процессами и производством (на примерах разработок ЦНИИКА). М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1978, с. 7—17.
24. Смирнов Н. И., Хитров Б. В., Лютиков Ю. А. Информационные и управляющие машины, применяемые на электростанциях. М.: Энергия, 1980. 240 с.
25. Стефани Е. П. Основы построения АСУ ТП. М.: Энергия, 1974. 240 с.
26. Правила технической эксплуатации электрических станций сетей. М.: Энергия, 1977. 288 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Автоматизация 7, 235, 256
 Автоматизированная система управления 9, 319
 Автоматическая система регулирования (АСР) 11, 13, 17, 19
 АСР замкнутая 15, 53, 72
 — комбинированная 18, 54
 — многосвязная 19, 54
 — одноконтурная 11, 53, 54, 83
 — программная 17, 54
 — разомкнутая 15, 53
 — следящая 17
 — экстремальная 20, 54
 Алгоритм 274, 275
 Аппаратура вспомогательная 137
 — измерительная 137, 146
 — регулирующая 139
 — функциональная 146
 Блок вычислительный 137
 — измерительный 128, 134
 — регулирующий 128, 145, 147
 — функциональный 145, 155
 — энергетический (энергоблок) 300, 301, 303, 305
 Воздействие возмущающее (возмущение) 13, 198, 213
 — входное 13, 61, 197
 — выходное 13, 61
 — регулирующее 13, 209
 Генератор электрический 6, 178, 179
 Группа функциональная 261, 319
 Давление 11, 12, 197, 198, 199
 Датчик 115, 128
 Демодулятор 131, 135
 Демпфер 120, 132
 Детектирование 24, 116
 Диапазон 117, 182
 Дизъюнкция 373
 Дифференциатор 77, 211, 226, 233
 Дубли-блок энергетический 300, 317, 318
 Задатчик 12, 117, 128
 Закон регулирования 7, 65, 67, 81, 83
 Заслонка 183, 186
 Затухание 42, 97, 103, 107
 Защита автоматическая 8, 277, 285, 289
 — главная 278
 — локальная 278
 — общеслочная 314, 316
 — тепловая 277
 Звено апериодическое 38, 49, 54
 — запаздывающее 44, 45, 49, 51
 — инерционное 37, 38, 49, 51
 — интегрирующее 43644, 54
 — колебательное 42, 49, 54
 — направленного действия 24
 — фазопережающее 48
 — фазосдвигающее 40, 43, 54
 Зона возврата 115, 121, 124, 150
 — нечувствительности 115, 121, 124
 Изображение интеграла 29
 — производной 28
 — функции 28, 59
 Изоляция гальваническая 133, 135
 — электрическая 299
 Индикатор 260, 270, 321
 Инверсия 271
 Качество 83, 95, 96, 97, 98
 Клапан 182, 183, 231, 233
 Код буквенный 336
 — цифровой 335
 Колебательность 92, 94
 Колонка дистанционного управления 170, 171
 Коммутация 259
 Конденсаторочистка 250, 251
 Контроль избирательный 326
 — индивидуальный 326
 — множественный 320, 326
 Конъюнкция 272
 Коэффициент полезного действия (КПД) 20, 209
 — усиления 7, 31
 Котел барабанный 197, 199
 — прямоточный 223, 224
 Критерий алгебраический 86, 89, 90
 — интегральный 91, 98, 105
 — квадратичный 99, 100, 107
 — управления 102, 113
 Линеаризация 57, 65, 115
 Машина электронновычислительная (ЭВМ) 331, 332, 333
 Мельница молотковая 243
 — шаровая 239
 Механизм исполнительный 155, 231
 Мнемосхема 267
 Модель математическая 56, 62
 — физическая 56
 Модуль вспомогательный 145
 — измерительный 139
 — регулирующий 139, 141
 — функциональный 142, 143
 Моноблок энергетический 300, 315, 316
 Надежность 227, 279, 280
 Нагрузка тепловая 199, 205
 — электрическая 179, 205
 Наладка 100, 103, 107, 108
 Нуль-орган 164, 170
 Объект управления 11, 197, 223
 Обеспечение информационное 333
 — математическое 334
 — организационное 334
 — программное 334
 Оптимизация динамическая 328, 337
 — статическая 327, 337
 Орган контроля 133
 — настройки 80, 132
 — регулирующий 7, 12, 103, 181
 Осветлитель 248
 Ошибка динамическая 97
 — статическая 97
 Параметр контролируемый 324
 — регулируемый 271
 — технологический 8, 329
 Пароохладитель 215, 217
 Перегрев вторичный 232
 — первичный 214, 230
 Перерегулирование 97, 98, 194

- Питатель дисковый 193, 194
 — ленточный 190
 — скребковый 191
 — тарельчатый 189
 — шнековый 192, 193
 Преобразователь дроссельный 271
 — первичный 141
 — функциональный 143
 Прибор измерительный 7
 — первичный 114, 115
 — регулирующий 155, 165
 Приемистость 301, 302
 Продувка непрерывная 221
 — периодическая 221
 Процесс переходный 20, 21
 — технологический 9, 11, 319
 Пускатель магнитный 173
 Разрежение 213, 214
 Расход видимый 225
 — действительный 225
 Регулятор автоматический 7, 8, 12, 205, 207
 — гидравлический 114
 — главный 140
 — корректирующий 108, 109
 — пневматический 114
 — стабилизирующий 114, 128
 — электрический 114, 128
 Регулирование автоматическое 8, 216, 220
 — вторичное 306
 — первичное 308
 Режим базовый 302
 — пульсирующий 125
 — регулирующий 302
 — стационарный 57, 59
 Резистор 149, 157, 158
 Самовыравнивание 64, 65
 Светодиод 158
 Связь гибкая (упругая) 79
 — обратная 15, 53, 62, 75, 77
 Сервопривод 75, 78, 79, 80, 101, 121
 Система информационная 330, 335
 — нейтральная 85, 86, 88
 — неустойчивая 22, 86
 — управляющая 15, 330
 — устойчивая 22, 85, 86, 87, 89, 90
 Сочленение кулачковое 196
 — редукторное 195
 — рычажное 195
 — тросовое 196
 Тепловая электрическая станция (ТЭС) 6, 178
 Топливоподача 235
 Тормоз механический 124
 — электрический (конденсаторный) 263
 — электромагнитный 171, 263
 Триггер 157
 Турбина паровая 6, 178
 Турбогенератор 179, 304, 316
 Управление автоматизированное 9, 145
 — автоматическое 121, 263
 Управление групповое 268, 269
 — дистанционное 8, 145
 — избирательное 266, 267
 — логическое 8, 271
 — супервизорное 336
 Усилитель линейный 138
 — магнитный 131
 — однополярный 119
 — операционный 119, 145
 — полупроводниковый 118
 — релейный 128
 Установка деаэрационная 251
 — редуционно-охладительная 181, 252
 — теплофикационная 254
 — теплоэнергетическая 178, 179
 Устойчивость 83, 85
 Устройство задающее 183
 — защитное 137
 — измерительное 116
 — командноусилительное 117
 — коммутационное 259
 — исполнительное 121
 — пусковое 128
 Шибер регулирующий 181
 Фильтр механический 246
 — химический 247
 — электрический (временной) 147, 148
 Функция вычислительная 139
 — информационная 326
 — логическая 139
 — передаточная 25, 27, 30, 53, 75
 — управляющая 330
 Частота резонансная 93
 — угловая 32
 — электрической сети 300, 308, 309
 Человек — оператор 8, 330, 336
 Чувствительность 116
 Характеристика амплитудно-частотная (АЧХ) 33, 49
 — динамическая 23, 24, 101
 — временная 47, 107, 122, 123
 — импульсная 32, 43, 49
 — комплексная частотная (КЧХ) 33, 38, 44, 49
 — конструктивная 186
 — переходная 30, 77, 78
 — рабочая (расходная) 182
 — скоростная 122, 123
 — статическая 23, 115, 120
 — фазочастотная (ФЧХ) 33, 39
 Щит блочный 325
 — главный 324
 Элемент релейный 127
 Эмиттер 118
 Экономичность процесса горения 208, 209, 210, 212
 Электропривод 259
 Энергоблок 300, 301

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Условные обозначения	4
Введение	6

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ. НАЧАЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Глава первая. Автоматическая система регулирования и ее элементы	11
1.1. Объект управления и автоматический регулятор	11
1.2. Классификация автоматических систем регулирования	16
1.3. Переходные процессы в системах регулирования	20
1.4. Способы математического описания звеньев и систем	23
1.5. Типовые динамические звенья	36
1.6. Соединения звеньев	50
Контрольные вопросы	53
Глава вторая. Тепловые объекты управления и их характеристики	54
2.1. Общие положения	54
2.2. Основы аналитического определения динамических характеристик тепловых объектов	56
2.3. Составление математических моделей тепловых объектов	60
Контрольные вопросы	65
Глава третья. Законы регулирования и способы их формирования в автоматических регуляторах	65
3.1. Типовые законы регулирования	65
3.2. Формирование законов регулирования в автоматических регуляторах	72
3.3. Структуры типовых регуляторов	76
Контрольные вопросы	83
Глава четвертая. Устойчивость и качество процессов регулирования	83
4.1. Процессы автоматического регулирования и методы анализа их устойчивости	83
4.2. Корневой и алгебраический критерии устойчивости	86
4.3. Частотный критерий устойчивости	90
4.4. Запас устойчивости	92
4.5. Качество процессов регулирования	95
Глава пятая. Выбор типа и расчет настроек автоматического регулятора	100
5.1. Выбор типа регулятора	100
5.2. Основы методов расчета	102
5.3. Расчет настроек на заданное M по участку КЧХ объекта	103
5.4. Расчет настроек по временным характеристикам объектов	107
5.5. Расчет настроек двухконтурных АСР	108
Контрольные вопросы	113

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Глава шестая. Общие сведения об автоматических регуляторах	114
6.1. Промышленные регуляторы и их основные элементы	114

6.2. Исполнительные устройства регуляторов	121
6.3. Формирование линейных законов регулирования в пульсирующем режиме	125
Контрольные вопросы	128
Глава седьмая. Аппаратура Московского завода тепловой автоматики (МЗТА)	128
7.1. Регулирующие блоки аппаратуры «Каскад-1»	128
7.2. Измерительный блок И-04	134
7.3. Функциональный состав аппаратуры «Каскад-1»	136
7.4. Регулирующая аппаратура «Каскад-2»	139
7.5. Регулирующие и функциональные блоки «Каскад-2»	145
Контрольные вопросы	146
Глава восьмая. Агрегатированный комплекс электрических средств регулирования	147
8.1. Регулирующие блоки АКЭСР 1	147
8.2. Функциональный состав аппаратуры АКЭСР 1	152
8.3. Регулирующие приборы АКЭСР 2	155
8.4. Состав функциональных блоков АКЭСР 2	159
8.5. Наладка регулирующих приборов и особенности применения аппаратуры АКЭСР 2 в системах управления	165
Контрольные вопросы	170
Глава девятая. Исполнительные механизмы автоматических регуляторов	170
9.1. Исполнительные механизмы МЗТА	170
9.2. Исполнительные механизмы типа МЭО	173
9.3. Пусковые устройства	173
Контрольные вопросы	177

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

Глава десятая. Тепловая электрическая станция как объект управления	178
10.1. Назначение тепловой автоматики на ТЭС	178
10.2. Регулирующие органы теплоэнергетических установок	181
10.3. Регулирующие органы расхода пара, газа и жидкостей	182
10.4. Регулирование подачи тягодутьевых машин и насосов	187
10.5. Регулирующие органы подачи топлива	189
10.6. Сочленение регулирующих органов с исполнительными механизмами	194
Контрольные вопросы	197
Глава одиннадцатая. Автоматическое регулирование паровых котлов	197
11.1. Барабанный паровой котел как объект управления	197
11.2. Регулирование давления пара и тепловой нагрузки барабанного котла	199
11.3. Регулирование экономичности процесса горения	208
11.4. Регулирование разрежения в топке	213
11.5. Регулирование температуры первичного перегрева пара	214
11.6. Регулирование питания барабанного котла водой	218
11.7. Регулирование качества котловой воды	220
11.8. Прямоточный паровой котел как объект управления	223

ОГЛ	11.9. Регулирование тепловой нагрузки, температурного режима первичного тракта и экономичности прямоточности котла	224
Предисл	11.10. Регулирование температуры первичного перегрева пара прямоточного котла	230
Условны	11.11. Регулирование температуры вторичного перегрева пара	232
Введение	Контрольные вопросы	235
ТЕОРИЯ	Глава двенадцатая. Автоматизация вспомогательного оборудования ТЭС	235
	12.1. Автоматизированное управление топливоподачей	235
	12.2. Автоматизация установок пылеприготовления	238
	12.3. Автоматизация установок химической очистки воды	246
	• 12.4. Автоматическое регулирование деаэраторных установок	251
	• 12.5. Автоматическое регулирование редуционно-охладительных установок	252
	• 12.6. Автоматическое регулирование теплофикационных установок	254
	12.7. Автоматизация вспомогательных установок паровых турбин	256
	Контрольные вопросы	258
Глава	Глава тринадцатая. Дистанционное и логическое управление	259
	2.1.	259
	2.2.	261
	2.3.	266
	Конт. 13.4. Системы логического управления	277
Глава	Контрольные вопросы	
	Глава четырнадцатая. Автоматические тепловые защиты и технологическая сигнализация	277
	3.1.	277
	3.2.	280
	3.3.	285
	Конт. 14.4. Автоматические защиты турбогенератора и вспомогательных установок	289
Глава	14.5. Технологическая сигнализация	296
	4.1. Контрольные вопросы	299
	Глава пятнадцатая. Автоматизация энергетических блоков	300
	4.2.	300
	4.3.	303
	4.4.	305
	4.5.	309
Глава	15.5. Общеблочные автоматические защиты	314
	Контрольные вопросы	318
	Глава шестнадцатая. Автоматизированные системы управления технологическими процессами тепловых электростанций	319
	5.1.	319
	5.2.	324
	5.3.	329
	5.4.	330
	5.5.	333
Конт	16.1. Организация управления теплоэнергетическими установками	338
	16.2. Назначение и состав функций АСУ ТП по энергоблоку	338
	16.3. Общестанционные функции АСУ ТП по контролю и управлению	340
АВТОМ	16.4. Функциональная структура АСУ ТП	
Глава	16.5. Реализация АСУ ТП ТЭС	
	Контрольные вопросы	
	6.1.	
	Список литературы	
	Предметный указатель	

О П Е Ч А Т К А

При чтении книги рис. 11.26 и 12.4 следует помещать местами.